

Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**Гробовенко Ярослав Віталійович**

УДК 66.047-912

**Дисертація**

**Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану**

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

\_\_\_\_\_ Я.В. Гробовенко

Науковий керівник: Марчевський Віктор Миколайович, кандидат технічних  
наук, професор

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Гробовенко Я. В.* Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2019.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану шляхом застосування вихрових потоків теплоносія і безперервного подрібнення матеріалу та розробленню методики для розрахунку промислового сушильного апарата.

В сучасних умовах в технології отримання дрібнодисперсного порошку діоксиду титану  $\text{TiO}_2$  лімітуючим та найбільш енергоємним процесом є сушіння пасти. Важливо, щоб залишкова сухість порошку діоксиду титану складала не менше 99,7 %. На досягнення такої величини сухості необхідно затратити значну енергії, а також застосовувати відповідний сушильний апарат, будова і принцип дії якої забезпечити необхідне подрібнення частинок пасти до утворення дрібнодисперсного порошку, а також його досушування до високої кінцевої сухості і сепарування від сушильного агенту. Важливо, щоб разом із процесом сушіння відбувався інтенсивний процес подрібнення гранул матеріалу до отримання дрібнодисперсного порошку.

В існуючих способах сушіння пастоподібного матеріалу діоксиду титану використовуються фонтануючі, киплячі або вихрові режими руху теплоносія. При цьому, через мінімальну різницю швидкостей газового теплоносія і твердих частинок основний опір процесу масообміну зосереджений у дифузійному шарі, розташованому безпосередньо біля поверхні твердих частинок. Підвищення інтенсивності дифузійно-контрольованих процесів можливе при реалізації безперервного подрібнення

вологого матеріалу, внаслідок чого постійно оновлюється волога поверхня із якої випаровується волога і, відповідно, зменшенню дифузійного опору масопередачі.

У літературі відсутні відомості щодо дослідження процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому потоці теплоносія, що підтверджує актуальність теми дисертації.

У роботі науково обґрунтовано принципи взаємодії газової фази із частинками матеріалу  $\text{TiO}_2$ , що супроводжується сепарацією тонкодисперсних частинок матеріалу та їх переміщенням у зону досушування.

Для реалізації цих умов було розроблено оригінальну конструкцію конусоподібної сушильної камери апарату та спосіб досушування матеріалу діоксиду титану до високої залишкової вологості не менше 99,7 %, що забезпечує двох-канальне підведення теплоносія до апарату.

Експериментально встановлено, що кінетичні закономірності процесів сушіння, досушування, диспергування та сепарації продукту.

У роботі розвинуто відому математичну модель сушіння пастоподібних матеріалів та запропоновано оригінальну методику вимірювання перепаду тиску, температури та вологості теплоносія в шарі та на виході із сушильної камери із застосуванням комп'ютеризованого комплексу, який дозволяє отримувати дані із частотою 63 Гц.

Розв'язок математичної моделі процесів сушіння та досушування матеріалу  $\text{TiO}_2$  проводився із використанням експериментально одержаних значень першого критичного вологовмісту та коефіцієнту подрібнення. Це дозволило прогнозувати необхідні затрати теплоносія на здійснення процесу сушіння. Отримано рішення математичного описання у вигляді залежностей вологовмісту і температури частинок  $\text{TiO}_2$  від часу сушіння і основних параметрів процесу, що необхідні для подальших експериментальних досліджень і проектування промислового сушильного обладнання.

Теоретично обґрунтовано та експериментально встановлено, що створення вихрових потоків теплоносія в сушильній камері дозволяє реалізувати процес сепарації крупнодисперсних агломератів від тонкодисперсних частинок матеріалу діоксиду титану.

Досліджено гідравлічні особливості вихрових потоків в сушильній камері оригінальної конструкції, що використовується для отримання тонкодисперсних матеріалів із паст. Для побудови 3-х вимірних рисунків з рухомими елементами та розрахунків параметрів вихрових потоків сушильного агенту, застосовувалась автоматизована система проектування та розрахунків SolidWorks Simulation. Проведений аналіз руху вихрових потоків, полів швидкостей та перепаду тиску сушильного агенту.

В результаті проведеної роботи отримані аеродинамічні показники вихрових потоків сушильного агенту, при аналізі яких можна удосконалити процес сушіння пастоподібних матеріалів та розробити найбільш ефективну конструкцію сушильних апаратів вихрового типу. Проаналізовано напрями вихрових потоків сушильного агенту при різних початкових витратах ( $0,033 \text{ м}^3/\text{с}$  та  $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ ) та отримано дві складові швидкостей: осьову і тангенційну. Осьова швидкість зосереджена по центру сушильної камери, і яка транспортує тонкодисперсні частинки матеріалу із зони розмелювання в зону досушування та виносить із камери. Тангенційна швидкість газової фази зосереджена по периферії сушильної камери, і яка сепарує частинки матеріалу і збільшує ефективність теплообміну між частинками і теплоносієм за рахунок турбулізації загального двофазного потоку і збільшення числа  $Re$ . Тангенціальна швидкість вихрового потоку зменшується внаслідок зменшення радіусу сушильної камери. Визначено коефіцієнт закручування вихрових потоків, що складає 5,5–7,0.

Проаналізовано поля розподілу тисків по об'єму оригінальної сушильної камери та визначено загальний перепад тиску. Завдяки заданій формі камери та закручених вихрових потоків сушильного агенту тиск зменшується від максимального значення у верхній частині камери до мінімального у нижній

частині, за рахунок чого вологі агломерати по конусоподібних стінках повертаються в зону диспергування.

В дисертаційній роботі експериментальним шляхом визначено необхідні коефіцієнти гідравлічного опору оригінальної конструкції сушильної камери із вихровими потоками теплоносія, яка має зону диспергування тонкодисперсного матеріалу та зону досушування частинок до високої кінцевої сухості. Також показано поля розподілу швидкостей і тисків теплоносія, що важливо для моделювання тепломасообмінних процесів між двома фазами системи, а також транспортування підсушеного дисперсного продукту із зони диспергування і направлення його у зону досушування.

Узагальнення експериментальних даних проведено у вигляді функціональних залежностей подрібнення матеріалу від часу сушіння, зміни вологовмісту і температури матеріалу від часу сушіння.

Перевірка достовірності фізичної та математичної моделей проводилась на пілотній установці при дослідженні кінетики процесів сушіння і досушування пасти діоксиду титану.

Обґрунтовано технологічну схему промислової сушильної установки продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі для одержання порошкоподібних продуктів із застосуванням оригінальної конструкції промислового сушильного апарата, що містить конусоподібну камеру.

Удосконалено методику розрахунку сушильного апарату із вихровими потоками теплоносія та диспергатором у нижній частині сушильної камери при застосуванням промислових газових пальників для нагріву теплоносія.

*Ключові слова:* процес сушіння, псевдозрідження, діоксид титану, подрібнення, вихрові потоки, теплоносій, математична модель, сепарація, тонкодисперсні частинки.

## SUMMARY

Y. Grobovenko. The process of drying a disperse paste of titanium dioxide.  
– Qualification scientific work manuscript copyright.

The thesis for obtaining the scientific degree the candidate of technical sciences (for the Ph.D.), specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to increase of efficiency of process of drying of a fine paste of titanium dioxide by application of vortex flows of coolant and continuous grinding of material and development of methodology for calculation of industrial drying apparatus.

In the current conditions, the technology of obtaining fine powder of titanium dioxide  $\text{TiO}_2$  limiting and the most energy-intensive process is drying paste. It is important that the residual dryness of the titanium dioxide powder is at least 99.7%. Achieving such a dry amount requires considerable energy, as well as using a suitable drying apparatus, the structure and principle of which provide the necessary grinding of the paste particles to form a fine powder, as well as drying it to a high final dryness and separation from the drying agent. It is important that, together with the drying process, an intensive process of grinding the pellets of the material to obtain a fine powder occurs.

In existing methods of drying a paste-like material of titanium dioxide are used fountains, boiling or vortex modes of motion of the coolant. At the same time, due to the minimal difference between the velocities of the gas coolant and the solids, the main resistance of the mass transfer process is concentrated in the diffusion layer located directly near the surface of the solids. Increasing the intensity of diffusion-controlled processes is possible in the implementation of continuous grinding of wet material, resulting in a constantly updated moist surface from which moisture evaporates and, consequently, reduce the diffusion resistance of mass transfer.

There is no information in the literature on the study of the process of drying the fine paste of titanium dioxide in the vortex flow of the coolant, which confirms the relevance of the topic of the thesis.

The principles of gas phase interaction with particles of  $\text{TiO}_2$  material are scientifically substantiated, which is followed by separation of fine particles of material and their transfer to the drying zone.

To realize these conditions, the original design of the cone-shaped drying chamber of the apparatus and the method of drying the material of titanium dioxide to a high residual humidity of at least 99.7 % were developed, which provides a two-channel supply of coolant to the apparatus.

It is experimentally established that the kinetic regularities of the processes of drying, drying, dispersing and separation of the product.

A well-known mathematical model for the drying of paste-like materials was developed and the original method for measuring the pressure drop, temperature and humidity of the fluid in the layer and at the outlet of the drying chamber using a computerized complex was obtained, which allows obtaining data with a frequency of 63 Hz.

The mathematical model of the  $\text{TiO}_2$  drying and drying processes was solved using the experimentally obtained values of the first critical moisture content and the grinding coefficient. This allowed us to predict the required costs of the coolant for the drying process. The solution of mathematical description in the form of dependences of moisture content and temperature of  $\text{TiO}_2$  particles on the drying time and the basic process parameters, which are necessary for further experimental research and design of industrial drying equipment, was obtained.

It is theoretically substantiated and experimentally established that the creation of vortex flows of the coolant in the drying chamber allows realizing the process of separation of coarse agglomerates from fine particles of titanium dioxide material.

The hydraulic features of the vortex flows in the drying chamber of the original design, which is used to obtain fine materials from pastes, are investigated.

SolidWorks Simulation automated design and calculation system was used to construct 3-dimensional drawings with moving elements and to calculate the vortex flow parameters of a drying agent. The motion of eddy flows, velocity fields and pressure drop of the drying agent was analyzed.

As a result of the work, the aerodynamic parameters of the vortex flows of the drying agent were obtained, in the analysis of which the process of drying the paste-like materials can be improved and the most efficient design of the vortex-type drying apparatus to be developed. The directions of vortex flows of the drying agent at different initial costs ( $0,033 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ ) were analyzed and two velocity components were obtained: axial and tangential. The axial velocity is centered in the center of the drying chamber, which transports fine particles of material from the grinding zone to the drying zone and removes it from the chamber. The tangential velocity of the gas phase is concentrated around the periphery of the drying chamber, and which separates the particles of the material and increases the efficiency of heat exchange between the particles and the coolant due to the turbulence of the common two-phase flow and increasing the number of  $Re$ . The tangential velocity of the vortex flow decreases as the radius of the drying chamber decreases. The twisting coefficient of vortex flows is determined, which is 5,5–7,0.

The pressure distribution fields by volume of the original drying chamber are analyzed and the total pressure drop is determined. Due to the predetermined shape of the chamber and the swirling eddy flows of the drying agent, the pressure is reduced from the maximum value in the upper part of the chamber to the minimum in the lower part, whereby the wet agglomerates on the conical walls return to the dispersion zone.

In the dissertation, the necessary coefficients of hydraulic resistance of the original design of the drying chamber with vortex flows of the coolant, which has a zone of dispersion of finely dispersed material and a zone of drying of the particles to high final dryness, have been experimentally determined. Also, the velocity and pressure distribution fields of the coolant are shown which is important for



modeling the heat transfer processes between two phases of the system, as well as transporting the dried dispersed product from the dispersion zone and directing it to the drying zone.

Summarization of the experimental data was carried out in the form of functional dependencies of grinding material on drying time, changes in moisture content and temperature of the material on drying time.

The validation of the physical and mathematical models was performed on a pilot plant in the study of the kinetics of the processes of drying and drying of titanium dioxide paste.

The technological scheme of industrial drying plant with a capacity of 500 kg/h is substantiated. On evaporated moisture to obtain powder products using the original design of an industrial drying apparatus containing a conical chamber.

The method of calculation of the drying apparatus with vortex flows of coolant and dispersant in the lower part of the drying chamber with the use of industrial gas burners for heating the coolant has been improved.

*Keywords:* drying process, fluidization, titanium dioxide, grinding, vortex flows, coolant, mathematical model, separation, fine particles.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у фахових виданнях:*

1. Марчевський В.М. Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агенту в сушильній камері / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки - 2018. № 1 (81) – с. 38-42. (Входить до наукометричних баз: Index Copernicus, DOAJ). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування умов реалізації вихрового шару частинок пасту  $TiO_2$  та визначення коефіцієнтів гідравлічного опору сушильної камери і диспергатора, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

2. Marchevskii V. Kinetics of drying the titanium dioxide paste in the vortex dryer / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**, V. Telestakova // Ukrainian Food Journal – Volume 7, Issue2, 2018. – pp. 311-323. (Входить до наукометричних баз: Web of Science, Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування та розв'язання математичної моделі процесу, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів.*

3. Marchevskii V. Product grinding influence on the drying process of dispersed titanium dioxide paste / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**// Ukrainian Journal of Food Science – Volume6, Issue 1, 2018. – pp. 188-198. (Входить до наукометричних баз: Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: теоретичні дослідження процесів подрібнення, сушіння та досушування тонкодисперсної пасту діоксиду титану, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів.*

4. Марчевський В.М. Задача ефективного управління процесом отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану в ході вихрової сушки/ Марчевський В.М., **Гробовенко Я.В.** // Автоматизація технологічних і бізнес процесів – Том 10, № 3, 2018. – с. 49-56. (Входить до наукометричних баз: Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Cabi, ROAD, Cross Ref, Research Bib). *Особистий внесок здобувача: аналіз конструкцій сушильних апаратів та диспергаторів, робота над апаратним забезпеченням, проведення експериментальних досліджень процесів сушіння пасту діоксиду титану та досушування тонкодисперсного порошку  $TiO_2$ , визначення та аналіз кінетичних закономірностей вологовмісту і температури продукту від часу сушіння.*

5. Marchevskii V. Probation results of the original swirling drying apparatus for paste products/ V. Marchevskii, **Y. Grobovenko** // Mechanics and Advanced Technologies – Vol. 2, No. 83, 2018. – pp. 100-107. (Входить до наукометричних баз: Index Copernicus, PIIЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), Cite Factor, DAOJ, World Cat, BASE, EBSCO). *Особистий внесок здобувача: теоретичний аналіз процесів сушіння кристалоподібних тонкодисперсних продуктів, розробка і виготовлення дослідного сушильного апарату та проведення досліджень кінетики сушіння пасту діоксиду титану.*

### ***Патенти на корисні моделі:***

6. Патент № 107088 Україна МПК F26B 3/084 (2006.01) Сушильна установка із псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування технологічних параметрів конструкцій сушильної камери та живильника-дозатора і визначення необхідних технічних параметрів, що необхідні для проектування сушильної установки.*

7. Патент № 107089 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Спосіб для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. *Особистий внесок здобувача: проведення патентного пошуку, обґрунтування технології способу сушіння пастоподібних матеріалів, аналіз гідродинаміки вихрових потоків теплоносія.*

8. Патент № 108688 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 09.02.2016; Опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструкції сушильних шахт апарату, розрахунок енергозатрат установки на проведення процесу сушіння паст і порівняння отриманих параметрів із аналогами.*

9. Патент № 131110 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних продуктів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В., Візерський Д.С.; Заявл. 07.06.2018; Опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструкції сушильної камери апарату, розрахунок енергозатрат установки на проведення процесу сушіння паст і порівняння отриманих параметрів із аналогами.*

### **Статті у інших виданнях:**

10. Marchevskii V.M. Simulation of drying fine particles  $TiO_2$  in a stream of drying agent / V.M. Marchevskii, **Y.V. Grobovenko**, D.S. Vizerskyi / Scientific-discussion – 2017. № 3 – с. 21-24. (Входить до наукометричних баз: Research Bib, SIS, DИF). *Особистий внесок здобувача: теоретичне моделювання гідродинаміки вихрових потоків теплоносія в сушильній камері за допомогою системи SolidWorks, обґрунтування фізичної та математичної моделей сушіння пасту діоксиду титану та проведення експериментальних досліджень на оригінальній сушильній установці.*

11. Марчевський В.М. Процес сушіння діоксиду титану / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // International Scientific Journal, 2016. №5 – с. 22-24. (Входить до наукометричних баз: Cross Ref, РИНЦ, ОАІ, Research Bib, JIF, BASE, Journal Factor, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, Cite Factor, I2OR, RePEс). *Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих способів і установок для сушіння тонкодисперсних паст, вибір сушильного обладнання для проведення процесу сушіння пасту діоксиду титану і досушування тонкодисперсного порошку  $TiO_2$ , удосконалення фізичної моделі та розв'язання математичної моделі процесів сушіння та досушування, аналіз отриманих результатів.*

12. Марчевський В.М. Процес сушіння пасту діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Наукове товариство Smart and Young – 2016, Випуск № 11-12 – с. 55-57. (Входить до наукометричних баз: Quality Factor, Index Copernicus, Научная

електронная библиотека). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування гідродинаміки вихрового потоку сушильного агенту в сушильній камері, знаходження розміщення зон диспергування, сепарування та досушування продукту в сушильній камері шляхом імітаційного моделювання в системі SolidWorks, проектування конструкції сушильного апарату та живильника-дозатора.*

13. Марчевський В.М. Моделювання процесу сушіння тонкодисперсних часток  $TiO_2$  в потоці сушильного агенту / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – 2016. № 1 – с. 25-27. *Особистий внесок здобувача: проведення математичного моделювання процесу досушування тонкодисперсної пасту  $TiO_2$ , аналіз отриманих кінетичних закономірностей та проведення експериментальних досліджень процесу досушування в оригінальному сушильному апараті.*

14. Марчевський В.М. Гідродинаміка вихрового сушильного апарату для пастоподібних продуктів / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Наука онлайн: Міжнародний електронний науковий журнал – 2018. – № 6. (Входить до наукометричних баз: Cross Ref, РИНЦ, OAJ, Research Bib, JIF, BASE, Journal Factor, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, Cite Factor, I2OR, RePEc). *Особистий внесок здобувача: дослідження гідродинаміки вихрових потоків теплоносія та експериментальне визначення коефіцієнтів гідравлічного опору диспергатора та каналу сушильної камери апарату.*

#### ***Тези доповідей в збірках матеріалів конференцій:***

15. Марчевський В.М. Сушильна установка з псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 95–96. *Особистий внесок здобувача: фізичне та математичне моделювання процесу сушіння та*

*обґрунтування конструкції сушильної установки і диспергатора.*

16. Марчевський В.М. Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів у вихровому шарі / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 80–81. *Особистий внесок здобувача: проведення аналізу існуючих способів сушіння паст і конструкцій сушильних апаратів, обґрунтування конструкції апарату та аналіз основних технологічних параметрів процесу сушіння.*

17. Марчевський В.М. Залежність конфігурації потоків в корпусі сушильної установки від напрямку подачі теплоносія / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко, Д.С. Візерський // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 26-27 квітня 2017 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2017. – С. 64–65. *Особистий внесок здобувача: моделювання гідродинаміки вихрового руху сушильного агенту в сушильній камері, знаходження розміщення зони сепарації тонкодисперсних частинок  $TiO_2$ , визначення швидкісних режимів вихрових потоків теплоносія на сушіння та досушування продукту.*

18. Марчевський В.М. Процес сушіння пасту діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Хімічна технологія і техніка: 81 міжнародна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів, 2017 р: збірник тез доповідей. – Мінськ, Білорусь, 2017. – С. 137–138. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, здійснення моделювання гідродинаміки вихрових потоків із застосуванням програмного забезпечення SolidWorks, аналіз та узагальнення отриманих результатів дослідження.*

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>17</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>20</b>
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>28</b>
1.1 Характеристики діоксиду титану та сфери його застосування.....	28
1.2 Основні способи промислового отримання $TiO_2$ .....	31
1.3 Аналіз існуючого обладнання для сушіння тонкодисперсних паст.....	33
1.4 Гідродинаміка вихрових потоків і проблема організації активного гідродинамічного режиму.....	51
1.5 Сучасні методи описання тепло- і масопереносу у вихровому шарі.....	58
Висновки до розділу 1.....	65
<b>РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ</b>	
<b>ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ <math>TiO_2</math>.....</b>	<b>67</b>
2.1 Теоретичні дослідження траєкторій та гідродинаміки вихрових потоків сушильного агента в розробленій сушильній камері.....	67
2.2 Фізична модель процесу сушіння тонкодисперсної паста та досушування порошку діоксиду титану.....	80
2.3 Математична модель процесу сушіння тонкодисперсної паста та досушування порошку діоксиду титану.....	85
2.4 Розв’язання математичної моделі.....	99
2.5 Результати числового розв’язання та їх аналіз.....	102
Висновки до розділу 2.....	106
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ</b>	
<b>СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ.....</b>	<b>107</b>
3.1 Конструкція спроектованої та виготовленої лабораторної сушильної установки та спосіб сушіння тонкодисперсної паста $TiO_2$ .....	107
3.2 Визначення коефіцієнтів гідравлічного опору основних частин вихрової сушильної камери.....	108

3.3 Експериментальні дослідження подрібнення конгломератів пасти діоксиду титану.....	116
3.4 Визначення основних кінетичних параметрів процесу сушіння пасти діоксиду титану.....	118
3.5 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі процесу сушіння тонкодисперсної пасти та досушування порошку $TiO_2$ .....	119
Висновки до розділу 3.....	136
<b>РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	140
4.1 Алгоритм розрахунку сушильної установки із вихровим потоком теплоносія.....	140
4.2 Розрахунок допоміжного обладнання.....	148
Висновки до розділу 4.....	153
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	154
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	156
Додаток А. Чисельний розрахунок математичної моделі процесу сушіння пасти діоксиду титану.....	168
Додаток Б. Розрахунок похибок вимірювань.....	177
Додаток В. Визначення величин та залежностей при проведенні комплексних експериментальних досліджень .....	191
Додаток Г. Результати експериментальних досліджень гідравлічного опору сушильного апарату .....	197
Додаток Д. Результати експериментальних досліджень подрібнення пасти діоксиду титану на ножовому диспергаторі .....	200
Додаток Е. Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння пасти діоксиду титану в сушильному апараті вихрового типу .....	202
Додаток Є. Розрахунок сушильної установки для сушіння пасти діоксиду титану із застосуванням вихрових потоків теплоносія .....	207
Додаток Ж. Акти впровадження результатів досліджень.....	212



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

$c$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$T$  – абсолютна температура, К;

$t$  – температура, °С;

$\tau$  – час, с;

$m$  – маса, кг;

$q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_v$  – об’ємний тепловий потік, Вт/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$x, y, z$  – декартові координати, м;

$K_v$  – спектральний коефіцієнт поглинання, м<sup>-1</sup>;

$k_{ij}$  – загальні коефіцієнти тепломасопереносу,  $i, j = 1, 2, 3$ ;

$a_m$  – коефіцієнт дифузії вологи, м<sup>2</sup>/с;

$a_m^T$  – коефіцієнт термодифузії вологи, м<sup>2</sup>/К·с;

$\delta_T$  – термоградієнтний коефіцієнт переносу вологи, К<sup>-1</sup>;

$k_p$  – коефіцієнт фільтраційного переносу вологи, м<sup>2</sup>/К·с;

$j$  – потік вологи всередині пасти діоксиду титану, кг/м<sup>2</sup>·с;

$\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення рідини в пар;

$j_3$  – потік вологи з поверхні пасти TiO<sub>2</sub> назовні, кг/м<sup>2</sup>·с;

$\beta$  – коефіцієнт вологообміну в періоді нагрівання та постійної швидкості сушіння, с/м;

$\mu$  – хімічний потенціал, Дж/моль;

$p_n$  – тиск насиченої пари, Па;

$p_n$  – парціальний тиск пари, Па;

$\phi$  – відносна вологість повітря;

$w_{\text{суш}}$  – швидкість сушіння на всій тривалості процесу, кг/(кг·с);

$N$  – швидкість сушіння в періоді постійної швидкості,  $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ;

$R_V$  – відношення об'єму тіла до його поверхні;

$\beta_2$  – коефіцієнт вологообміну в другому періоді сушіння,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$u$  – вологовміст,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;

$k$  – константа сушіння в другому періоді,  $\text{с}^{-1}$ ;

$r$  – масова теплота випаровування води,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$F$  – площа поверхні,  $\text{м}^2$ ;

$w$  – вологість матеріалу;

$s$  – сухість матеріалу;

$\delta$  – товщина шару,  $\text{м}$ ;

$n$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні;

$\alpha_k$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$l$  – визначальний розмір,  $\text{м}$ ;

$Pr$  – число Прандтля;

$Gr$  – число Гросгофа;

$Nu$  – число Нусельта;

$Re$  – число Рейнольдса;

$\nu$  – кінематична в'язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\beta_p$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення,  $\text{К}^{-1}$ ;

$U$  – напруга,  $\text{В}$ ;

$W$  – потужність,  $\text{Вт}$ ;

$Q_p^H$  – нижча питома теплота згорання палива,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ .

Основні індекси:

$\lambda$  – стосується переносу тепла теплопровідністю;

$n.c.$  – стосується навколишнього середовища;

$eff$  – стосується середнього значення величини системи тіл;

$i$  – стосується виду фази;

$air$  – стосується повітря;

a.c.m. – стосується абсолютно сухого порошку  $\text{TiO}_2$ ;

w – стосується вологи;

0 – стосується скелета матеріалу;

p – стосується рівноважного стану;

z – стосується координати по висоті вихрової сушильної камери;

Основні скорочення:

ФШ – фонтануючий шар;

АЕШ – аерофонтанний шар;

ВШ – вихровий шар;

КШ – киплячий шар;

ВКШ – віброкиплячий шар;

ПКШ – прохідний киплячий шар;

ПТ – пневмотранспорт;

КТ – конвективний теплообмін;

ДСТУ – державний стандарт України;

ГОСТ – “государственный стандарт”;

ТУ – технічні умови;

кафедра МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв;

ІХФ – інженерно-хімічний факультет;

НТУУ «КПІ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

США – Сполучені Штати Америки;

ПТК – промислова торгівельна компанія;

ПАТ – публічне акціонерне товариство;

ПрАТ – приватне акціонерне товариство;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

ВАТ – відкрите акціонерне товариство;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

## ВСТУП

Процес сушіння тонкодисперсних паст – технологічний процес, що містить сукупність процесів переносу тепла і маси. При виборі оптимального режиму сушіння і раціональної конструкції сушильного апарату необхідно забезпечити умови, що потрібні для отримання заданих технологічних властивостей матеріалу, які вимагають промислові стандарти, і високу інтенсивність процесу при малих витратах енергії. Раціональний спосіб сушіння і конструкція сушильних апаратів встановлюються тільки для конкретного матеріалу або групи матеріалів, що мають подібні фізико-хімічні властивості. В даній роботі в якості матеріалу розглядається тонкодисперсна паста діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ).

Сушильна техніка практично розвивається по двом основним напрямкам:

- розробка раціонального способу сушіння і відповідної конструкції апарату для нових технологічних виробництв;
- удосконалення способів сушіння і конструкцій сушильних апаратів для діючих виробництв.

При розробці і впровадженні в промисловість багатофункціональних високоефективних сушильних апаратів із активними гідродинамічними режимами повинні бути виконані дві основні умови:

- відповідність кінетики процесу сушіння математичним залежностям, що описують фізичні явища, які відбуваються при сушінні матеріалу;
- відповідність гідродинамічних і термодинамічних умов процесу сушіння змінюваним станам і властивостям матеріалу.

При вирішенні цих задач необхідно виконати наступні умови:

- отримати найкращі якісні показники готового продукту;
- мати мінімальні питомі витрати теплоти і електроенергії на 1 кг випареної вологи та на 1 кг готового продукту;

- при високій інтенсивності процесу сушіння, мати відповідно мінімальні габарити установки і її невелику вартість;
- мати можливість повної автоматизації сушильного агрегату для інтенсифікації сушіння при високій якості продукту;
- отримати обґрунтовану високу потужність одиничного сушильного агрегату.

Вибір способу сушіння і апаратурного оформлення не буде повним, якщо не врахувати:

- безпечність процесу із дотриманням вимог екології;
- забезпечення інтенсифікації процесу сушіння, якості висушеного продукту і економії теплової енергії.

#### **Актуальність теми.**

Важливою науковою проблемою є зменшення затрат теплової енергії в процесах сушіння, на здійснення яких витрачається до 25 % світового виробництва енергії [1]. Недостатньо вирішеною проблемою є зменшення енергозатрат та інтенсифікація сушіння у виробництвах тонкодисперсних порошків, зокрема діоксиду титану. Попит ринку на діоксид титану зростає. Великими споживачами діоксиду титану  $TiO_2$  є лакофарбова, металургійна, паперова, фармацевтична та інші галузі промисловості, де він використовується в якості наповнювача. Діоксид титану також використовується, як наповнювач для виготовлення різних пластичних мас і виробів та при виробництві високоякісного паперу.

У технології виробництва діоксиду титану процес сушіння пасти  $TiO_2$  є найбільш енергоємний і лімітуючий процес. Одним із основних показників готової продукції є мала залишкова вологість тонкодисперсного порошку. Вона має бути не більшою ніж 0,3 %. Для отримання такого значення залишкової вологості в звичайних сушильних апаратах збільшують температуру теплоносія на виході із сушарки, що приводить до значних затрат теплової енергії. В процесі сушіння необхідно руйнувати агломерати,

витримувати вузький діапазон вологовмісту, проводити сепарацію частинок за геометричними розмірами, очищати відпрацьований теплоносій.

Крім того процес сушіння вимагає зменшення витрат теплової енергії на сушіння пасти, збільшення швидкості сушіння та підвищення якості і забезпечення низької залишкової вологості готового продукту. Тому дослідження процесу сушіння пасти діоксиду титану та розробка нового високоефективного і енергоощадного обладнання для отримання продукту  $TiO_2$  із високими заданими механічними і споживчими властивостями є актуальною задачею.

### **Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та ініціативної теми № 04/15 IXФ «Процес сушіння дрібнодисперсної пасти діоксиду титану».

Дисертаційна робота відповідає напряму фундаментальних та прикладних наукових досліджень НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – «Створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, хімічній, легкій, нафтопереробній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, розробки об'єктно-орієнтовних систем, конструкційно-технологічного моделювання та забезпечення якості й надійності прогресивної техніки».

Дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 р., затверджених Кабінетом міністрів України (згідно Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 р. Про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки та Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (Додаток до постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.))»).

**Мета та задачі дослідження.**

Встановити кінетичні закономірності процесу сушіння тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$  та основні параметри, що необхідні для розробки промислових сушильних установок.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих способів сушіння пастоподібних продуктів та конструкцій сушильних установок.
2. Сформулювати фізичну модель процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  та досушування тонкодисперсного порошку  $\text{TiO}_2$  до високої кінцевої сухості.
3. Розробити і розв'язати математичну модель процесу сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  для розрахунку промислових сушильних установок.
4. Спроекувати та виготовити лабораторну сушильну установку та методику досліджень процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$ .
5. Провести експериментальні дослідження процесів сушіння і диспергування тонкодисперсної пасти діоксиду титану.
6. Провести аналіз отриманих результатів та підтвердити адекватність математичної моделі.
7. Розробити алгоритм розрахунку промислової сушильної установки для сушіння пасти  $\text{TiO}_2$ .
8. Розрахувати економічну ефективність розробленої сушильної установки та порівняти результати із аналогами.
9. Впровадити результати наукової роботи в навчальний процес та в промисловість.

*Об'єкт дослідження* – процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану  $\text{TiO}_2$  у вихровому сушильному апараті.

*Предмет дослідження* – кінетика процесу сушіння пасти діоксиду титану та параметри процесу, що необхідні для проектування промислових сушильних установок.

**Методи досліджень.** У дисертаційній роботі застосовано: методи механіки вихрових потоків газових фаз та теорії тепломасоперенесення; методи фізичного і математичного моделювання процесів тепломасоперенесення; експериментальні статичні і динамічні методи для визначення перепадів тиску газової фази, кінетики процесів подрібнення, сушіння та досушування тонкодисперсних продуктів; інтерполяційні і статистичні методи для обробки та оцінки вірогідності результатів експериментальних досліджень; оптичний метод визначення фракційного складу тонкодисперсних продуктів; комп'ютерні (вимірювання вологості і температур системою на базі контролера *Arduino UNOR3* із застосуванням датчиків-модулей GY-21 HTU21 та терморезисторів PT100; вимірювання температурних полів в об'ємі вихрових потоків із застосуванням хромель-копелевих термопар; моделювання гідродинаміки у програмному середовищі *SolidWorks*); фото-відео аналіз (визначення потужності подрібнення пасти діоксиду титану).

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  і досушування тонкодисперсних частинок порошку діоксиду титану в одному апараті вихрового типу.
2. Вперше отримано кінетичні закономірності і основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок.
3. Експериментально визначено вплив безперервного подрібнення часток вихрового шару на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.
4. Вперше сформульована фізична модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія, що створюється в розробленому сушильному апараті.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Сформульована послідовність процесів, що забезпечують високу якість кінцевого продукту – тонкодисперсного порошку діоксиду титану.



2. Встановлені найбільш раціональні параметри протікання процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок до залишкової вологості 0,3%.
3. Експериментально отримано значення коефіцієнта швидкості сушіння  $K_w$  пасти діоксиду титану, що дозволило розрахувати математичну модель процесів сушіння і досушування пасти  $TiO_2$ .
4. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок пасти  $TiO_2$ .
5. Розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 1200 кг/год. по випареній волозі, для проведення сушіння пасти  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія;
6. За результатами досліджень розроблено конструкцію промислового сушильного апарата, на яку отримано патент України на корисну модель № 107089 МПК (2006.01) F26B 17/10, опубл. 25.05.2016, Бюл. №10);
7. Створено дослідну комп'ютеризовану сушильну установку для дослідження кінетики сушіння;
8. Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджені в сушильному обладнанні ТОВ «Мілкленд» та ТОВ «Лакі-Фарма» і в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського».

**Особистий внесок здобувача, що викладені в дисертаційній роботі в:**

- аналізі вітчизняних та закордонних джерел літератури щодо процесів сушіння тонкодисперсних паст, зокрема, пасти діоксиду титану  $TiO_2$  та формулюванні науково-технічної проблеми;
- розробці математичної моделі та виборі методів її розв'язання;

- аналізі результатів математичного моделювання та визначення найбільш раціональних режимів проведення процесу сушіння і досушування;
- розробці методики проведення експериментальних досліджень, проведенні експериментальних досліджень та узагальненні результатів експериментів, визначенні експериментальних залежностей зміни вологовмісту та температури висушуваного матеріалу в часі;
- обробці отриманих результатів та їх аналізі і формулюванні основних положень та висновків;
- розроблені рекомендацій щодо практичного застосування результатів досліджень.

Формулювання фізичної та математичної моделей процесу, аналіз результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником к.т.н., проф. В. М. Марчевським.

**Апробація роботи.** Основні матеріали дисертації були представлені на науково-практичних конференціях:

*міжнародних:* VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (Київ, 19-20 квітня 2015 року); IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (Київ, 24-26 листопада 2015 року); XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (Київ, 26-27 квітня 2017 року); 81-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) «Химическая технология и техника» (Минск, 1-12 февраля 2017 года);

*звітньо-науковий семінар* на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, всі включені до наукометричних баз даних, 4 патенти України на корисну модель, 4 тези доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 5 статей в інших виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із анотації, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 215 сторінок, у тому числі 8 додатків на 53 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 162 сторінки. Робота містить 78 рисунків і 7 таблиць. Список використаних літературних джерел складається із 108 найменувань на 12 сторінках.

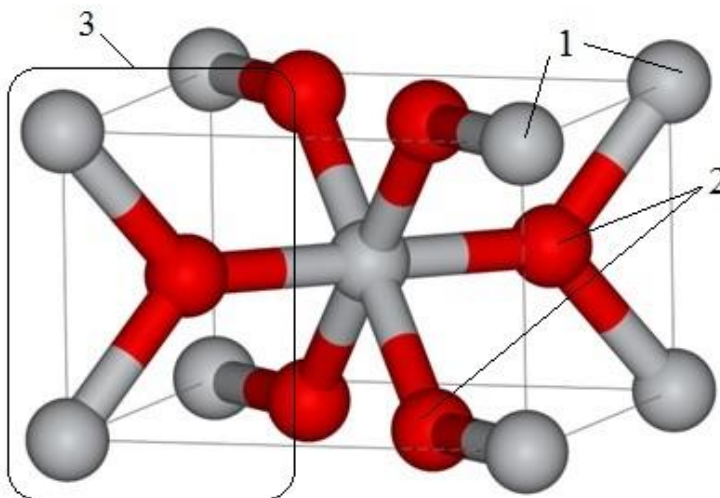
## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Характеристики тонкодисперсної пасти діоксиду титану

Діоксид титану відомий у вигляді декількох модифікацій: це тонкодисперсні кристали з тетрагональною сингонією (анатаз, рутил) і ромбічною сингонією (брукіт). Крім цих трьох модифікацій отримані ще дві модифікації високого тиску – ромбічна IV і гексагональна V, обидві є промисловими [1]. Паста  $\text{TiO}_2$  являє собою дисперсну систему, що складається із безперервно рідкого середовища, у якому розподілена велика кількість малих частинок (кристалів) твердої фази – діоксиду титану. Дисперсність матеріалу характеризує поверхню контакту твердої і газоподібної фаз [2].

Титан в кристалічній решітці оточують шість атомів кисню. Два атоми кисню розміщуються в тій же площині, що і титан, а по два атоми кисню знаходяться на поверхнях, розміщених вище і нижче вказаної поверхні. В комірці знаходиться по дві молекули  $\text{TiO}_2$ , що утворюють зв'язки з молекулами води у пастоподібному вигляді. Схема розміщення атомів в просторі представлена на рисунку 1.1 [1].



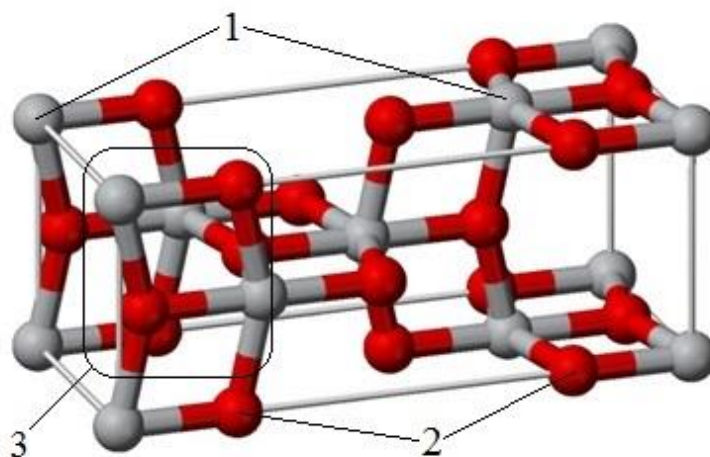
1 – атоми титану; 2 – атоми кисню; 3 – молекула  $\text{TiO}_2$

Рисунок 1.1 – Молекули діоксиду титану в рутильній формі

Анатаз також побудований із кисневих октаедрів та атомів Ti в центрі октаедрів. Октаедри анатаза відрізняються від рутилових тільки відстанню між атомами Ti і кисню, що лежать в одній площині. В комірці анатаза знаходяться чотири молекули  $\text{TiO}_2$ . Енергія решітки рутила відрізняється від енергії решітки анатаза на 0,5%, що, практично, на процес сушіння  $\text{TiO}_2$  вказаних форм не впливає [3].

При нагріванні анатаз необоротно перетворюється в рутил [3]. Перехід спостерігається в діапазоні температур від 300 до 1000 °C і проходить з різною швидкістю у випадку різних зразків  $\text{TiO}_2$ , що пояснюється впливом багатьох факторів: вмістом в зразках різних домішок, розміром частинок, тривалістю нагрівання. Чистий діоксид титану має безбарвні кристали, які жовтіють при нагріванні. Для технічних цілей застосовується в подрібненому до 12 – 15 мкм стані, являючи собою білий тонкодисперсний порошок.  $\text{TiO}_2$ , що не розчиняється у воді і концентрованих мінеральних кислотах за винятком плавикової.

Схема розміщення атомів анатаза в просторі представлена на рис. 1.2.



1 – атоми титану; 2 – атоми кисню; 3 – молекула  $\text{TiO}_2$

Рисунок 1.2 – Молекула діоксиду титану в анатазній формі

Діоксид титану широко використовується в різних галузях промисловості. Велика частина пігменту діоксиду титану використовується для виробництва масляних та кольорових фарб і емалей. В паперовій та

лакофарбовій промисловості  $\text{TiO}_2$  використовується у формі анатаза і рутила, як наповнювач паперу і фарб.

Діоксид титану з розміром частинок 10-60 мкм знайшов застосування для матування волокна штучного шовку (целюлози) в масі і на поверхні завдяки високій фотохімічній активності [3].

Поряд із крейдою, каоліном, гіпсом і іншими мінеральними пігментами, діоксид титану застосовується при виробництві білого паперу.  $\text{TiO}_2$  широко застосовують як каталізатор в реакціях дегідратації етилового спирту, окислення метиленового блакитного, конденсації оцтового альдегіда і багатьох інших. Крім того, діоксид титану застосовується для виробництва адсорбентів, напівпровідникових матеріалів і випрямлячів. Велике значення придбали тонкі плівки  $\text{TiO}_2$  в оптичному приладобудуванні – це прозорі інтерференційні плівки, які змінюють і регулюють оптичні властивості деталей зі скла, кварцу, кристалів і напівпровідникових матеріалів.

Однією з областей застосування діоксиду титану є неорганічні мембрани, що широко застосовуються для процесів мікрофільтраційного і ультрафільтраційного поділів. Керамічні мембрани на основі діоксиду титану становлять безсумнівний інтерес, оскільки володіють каталітичними і фотокаталітичними властивостями поряд з іншими перевагами керамічних мембран. Так, вони можуть бути використані як для каталізу, так і для видалення продуктів реакції завдяки функції поділу в газовій або рідкій фазах. Внаслідок фотохімічної активності мембрани на основі  $\text{TiO}_2$  здатні розкладати складні органічні молекули, такі як поліхлоровані дифеніли та інші забруднювачі навколишнього середовища. Крім того, мембрани на основі діоксиду титану зазвичай прозорі або слабо забарвлені, що дає їм переваги в окремих областях застосування, де бажані певні оптичні властивості. Ці мембрани володіють досить високою механічною міцністю.

Іншою перспективною сферою застосування діоксиду титану є його використання в якості носія для катодних каталізаторів зі зниженим вмістом платини.

Таким чином, можна зробити висновок, що діоксид титану є дуже перспективним матеріалом для використання його в сучасних галузях науки і техніки, що вимагає збільшення його виробництва. Одним із основних процесів у виробництві  $\text{TiO}_2$  є процес сушіння.

## 1.2 Основні способи промислового отримання $\text{TiO}_2$

Основними способами промислового отримання пігменту діоксиду титану є сірчано-кислотний і хлорний. Технологія виробництва  $\text{TiO}_2$  кислотним способом зображена на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Технологія виробництва  $\text{TiO}_2$  кислотним способом

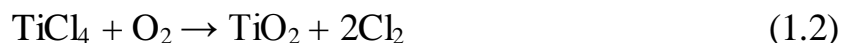
Сірчано-кислотний метод базується на обробці титанових руд сірчаною кислотою з отриманням розчину титаніл-сульфату  $\text{TiOSO}_4$ , який піддають гідролізу з отриманням гідроксиду титану  $\text{Ti}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Далі утворений осад прокалюють і отримують порошок діоксиду титану зі структурою анатазу або рутилу [4-5]. Стадії процесу отримання нанорозмірного  $\text{TiO}_2$  докладно розглянуті в [4].

Хлорний спосіб промислового отримання нанодисперсного порошку діоксиду титану базується на високотемпературних реакціях тетрахлориду титану в газовій фазі [4-5]. Існують два види хлорного способу: парофазний гідроліз і окислення.

В основі парофазного гідролізу лежить реакція:



Окислення – більш перспективний метод, що дозволяє створювати замкнутий цикл по хлору:



Окислення починається при 600 °С, але швидкість реакції невелика. Для досягнення потрібних швидкостей процес проводять при 1300 °С. Прогресивним методом є спалювання  $\text{TiCl}_4$  у високочастотному плазмотроні, де кисень повітря попередньо іонізують нагріванням до 2000 °С. Отримані частки  $\text{TiO}_2$  піддають різкому охолодженню – «гартуванню», щоб уникнути їх зростання, агрегації і спікання [4].

В даний час широко застосування набув метод отримання дрібнодисперсного діоксиду титану за золь-гель технологією, що включає велике різноманіття прийомів [6-10]. Золь-гель технологія є однією із найбільш перспективних методів масового отримання наночастинок і матеріалів на їх основі. Цей метод не тільки не вимагає великих витрат, але і дозволяє отримувати продукти особливої чистоти.

Золь-гель технологія дозволяє гнучко регулювати умови проведення процесу, що дає можливість отримати бажані структурні характеристики, такі як однорідність, розмір часток, їх морфологія, розмір, об'єм та питома площа поверхні [10]. Золь-гель процес – це процес отримання золю із наступним його переходом в гель шляхом коагуляції, структуроутворення, концентрування і т.д. У сучасному розумінні термін золь-гель процес (або золь-гель технологія) позначає цілий комплекс процесів, що включає зазвичай гідроліз, поліконденсацію, золе- і гелеутворення, сушіння та диспергування. В основі цієї технології лежать процеси контрольованого



гідролізу  $Ti(OR)_x$  в органічному середовищі розчинника. На першій стадії золь-гель процесу реакції гідролізу і поліконденсації призводять до утворення колоїдного розчину – золя, до складу якого входять частинки гідрооксидів із розмірами декілька десятків мкм. Збільшення об'ємної концентрації дисперсної фази призводить до інтенсивного утворення контактів між частинками, і, як наслідок, утворення монолітного гелю. Видалення розчинника із гелю відбувається шляхом його сушіння із наступним подрібненням до тонкодисперсного порошку.

Таким чином, кожен спосіб отримання готового продукту  $TiO_2$  містить процес сушіння пасти, який є найбільш енергоємний та лімітує продуктивність технологічного процесу.

Отже розробка нового енергозберігаючого та високоефективного обладнання для отримання якісного діоксиду титану є актуальна.

### **1.3 Аналіз існуючого обладнання для сушіння тонкодисперсних паст**

Вибір найбільш доцільного типу апарату для сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану здійснений на основі критичного аналізу значної кількості різноманітних факторів, що впливають на процес сушіння, такі як:

- характеристики пасти як об'єкта сушіння;
- питомі продуктивності апарату по випареній волозі, віднесені до площі перетину сушильної камери ( $кг_в/м^2$ ) та до об'єму камери ( $кг_в/м^3$ );
- питомі витрати енергії ( $кВт/т$ ) і теплоносія ( $м^3/т$ ) віднесені до 1 т готового продукту;
- якісні показники висушеного продукту;
- питома металоємність устаткування віднесена до 1 т готового продукту ( $кг/т$ );

- технологічні вимоги до сушіння, з урахуванням всіх кінетичних параметрів процесу, необхідних для отримання якісної продукції;
- вимоги екологічної та промислової санітарії;
- здатність конструкції сушильного агрегату протидіяти налипанню і агломерації вологого продукту.

Аналіз літератури [12, 16, 36, 39, 44, 55] показав, що в даний час вибір оптимального і доцільного типу сушильного апарату для тонкодисперсних паст являється складною задачею. Практично такий вибір здійснюють на основі кількісної або якісної оцінки відповідності відомих типів апаратів властивостям пасти. Важливими властивостями пасти є:

- величина питомої поверхні та розмір і об'єм пор, що визначають дифузійний опір внутрішньому масопереносу;
- термічний опір перенесенню теплоти;
- форми зв'язку води із матеріалом, що визначають енергію, яку необхідно витратити на сушіння та впливають на механізм переносу теплоти;
- гідравлічні параметри потоків теплоносія.

Визначення повного набору вказаних властивостей являється складною і об'ємною задачею, що потребує виконання значної кількості експериментальних робіт.

Після попередньої оцінки існуючого сушильного обладнання, із багатьох представлених апаратів було віддано перевагу групі сушилок типу «зважений шар». Це найбільш перспективна група апаратів для тонкодисперсних матеріалів [54,55], так як тільки вони дозволяють забезпечити тепломасоперенесення до кожної частинки. В цю групу входять агрегати наступних типів:

- киплячого шару та прохідного киплячого шару;
- типу «Флеш»;
- розпилюючого типу;
- фонтануючого шару та аерофонтанні;

- віброкиплячого шару;
- вихрового шару;
- пневмотранспорту;
- із закрученими потоками;
- із зустрічними закрученими потоками.

Вибраний список сушильних апаратів доповнюється апаратами із організованим псевдозрідженим шаром та пневматичними спіральними сушарками [55], а також комбінованими установками різних видів.

Порівняння основних питомих показників вибраних груп сушильних установок на основі представлених виробниками характеристик наведено в таблиці 1.1 [52].

Таблиця 1.1 – Порівняння питомих показників основних груп сушильних установок.

Тип сушильної установки	А, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}$	Б, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{год}}$	С, $\frac{\text{м}^3}{\text{т}}$	Д, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}_\text{в}}$	Е, $\frac{\text{кг}}{\text{кг}_\text{м} \cdot \text{с}}$	ККД, %
Сушарки киплячого шару	150-200	-	7000-16000	4000-6800	10-13	45-50
Сушарки фонтануючого шару	-	100-150	8000-16000	3000-4500	12-15	36-42
Сушарки віброкиплячого шару	100-300	-	8000-12000	4000-6000	8-11	45-55
Сушарки вихрового шару	-	500-600	16000-20000	3000-3300	8-12	55-65
Сушарки пневмотранспорту	-	480-600	11000-15000	4000-5500	18-22	35-40
Сушарки із закрученими потоками	-	350-500	18000-24000	2600-3500	9-14	55-65
Розпилюючі сушарки	-	30-120	15000-25000	4500-7000	16-24	40-45

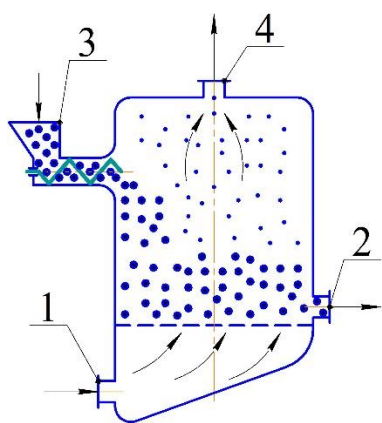
де А – продуктивність по волозі (на площу перетину камери),  $\text{кг}_\text{в}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$ ; Б – питома продуктивність по волозі (на об'єм камери),  $\text{кг}_\text{в}/\text{м}^3 \cdot \text{год}$ ; С – питомі витрати теплоносія на випаровування 1 т вологи,

$\text{м}^3 \cdot \text{с} / \text{т}$ ;  $D$  – питомі витрати теплової енергії на випаровування 1 кг вологи,  $\text{кДж} / \text{кг}_\text{в}$ ;  $E$  – питома металоємність установки (на 1 кг матеріалу),  $\text{кг} / \text{кг}_\text{м} \cdot \text{с}$ .

Як видно із таблиці 1.1, найбільшу продуктивність по випареній волозі мають вихрові сушарки, сушарки пневмотранспорту та сушарки із закрученими потоками, при середніх витратах теплової енергії.

Сучасні вихрові сушильні апарати [10-13] містять сушильну камеру з пристроями для подачі і диспергування пастоподібних, сипучих, дисперсних матеріалів та дифузور для подачі і розподілення теплоносія. Сушильна камера апарату може бути виконана у вигляді циліндра, конуса, чи комбінована, в нижній частині якої розміщений диспергатор (ротор). Верхня частина апарату з'єднана із ємкістю (наприклад, циліндричною), в якій вологий матеріал досушується в об'ємі теплоносія, закрученому в різні напрямки, вихровими потоками. Пастоподібний матеріал подається в сушильну камеру за допомогою живильника у вигляді окремих кластерів [14].

Апарати, у яких створюється гідродинамічний режим киплячого шару – найбільш відомі і добре вивчені. На рисунку 1.4 представлена схема апарату з КШ. Їх конструкції відрізняються формами, газорозподільними решітками, різними способами подачі та відводу матеріалу [10, 11]. Апарати КШ мають низьку гідродинамічну стійкість псевдозрідженого шару і застосовуються лише для полідисперсних матеріалів. Крім того, їх недоцільно застосовувати для сушіння пастоподібних матеріалів.



1 – патрубок для подачі теплоносія;

2 – патрубок для вивантаження сухого матеріалу;

3 – живильник-дозатор для подачі вологого матеріалу;

4 – патрубок для відведення запиленого теплоносія

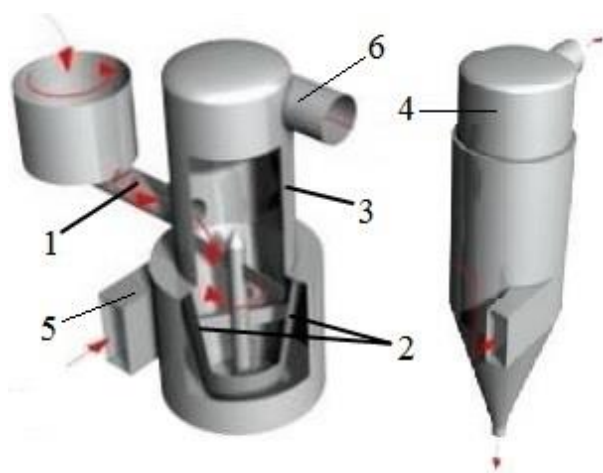
Рисунок 1.4 – Схема сушильного апарату з КШ.

Відомо, що для матеріалів, здатних до злипання, необхідно підтримувати стійкість киплячого шару шляхом збільшення

швидкості і, відповідно, витрат теплоносія, що знижує економічні показники апарату. Недоліки сушильних установок киплячого шару також полягають у значному гідравлічному опорі решітки шару. В апаратах КШ із інертними тілами є наявність домішок, що утворюються при стиранні інертних тіл, що утворюють киплячий шар. Враховуючи вищесказане, сушильні апарати з КШ недоцільно використовувати для сушіння пастоподібних тонкодисперсних матеріалів.

Апарати з прохідним киплячим шаром [12] принципово не відрізняються від апаратів з КШ. Різниця між ними визначається гідродинамічними режимами роботи [12-13]. Режим роботи сушильних апаратів із прохідним киплячим шаром використовують в тому випадку, коли швидкість витання частинок твердої фази (або їх агломератів) зменшується в процесі обробки, так що дисперсний матеріал спочатку сушиться в КШ, а потім виноситься із апарату.

Сушарки із вихровими потоками теплоносія (рисунок 1.5) містять пристрої для подачі вологого продукту, сушильні камери, пристрої для диспергування продукту та рукавні фільтри для очищення запиленого сушильного агенту від висушеного порошку [15].



- 1 – живильник-дозатор вологого матеріалу; 2 – ножі диспергатора;
- 3 – сушильна камера;
- 4 – рукавний фільтр;
- 5 – патрубок подачі теплоносія;
- 6 – патрубок відведення запиленого відпрацьованого теплоносія в рукавний фільтр

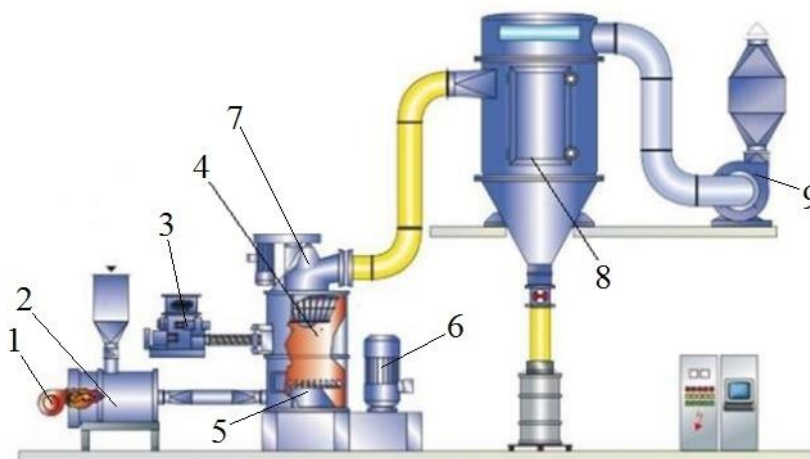
Рисунок 1.5 – Схема сушильного апарату із вихровими потоками теплоносія

Перевагою таких установок є те, що вони мають низький гідравлічний опір. Проте вагомими недоліками являється обмеження у часі перебування в апараті за який не встигає висохнути внутрішня зв'язана волога продукту та

значні енергозатрати на обертання ротора диспергатора, який знаходиться всередині сушильної камери.

Сушильна установка (рис. 1.6) [16] із закрученим потоком сушильного агенту, яка містить пристрій для подачі вологого матеріалу, калорифер, сушильну камеру із дисковим диспергатором, на якому по периферії розміщені диспергуючі елементи, відцентровий сепаратор та рукавний фільтр. Особливістю процесу є те, що крім сушіння вологого матеріалу додатково відбувається його диспергування, що інтенсифікує сушіння пасоподібних матеріалів.

Перевагою даної конструкції є попередня сепарація крупнодисперсних частинок у відцентровому сепараторі, що розміщений у верхній частині сушильної камери перед рукавним фільтром.



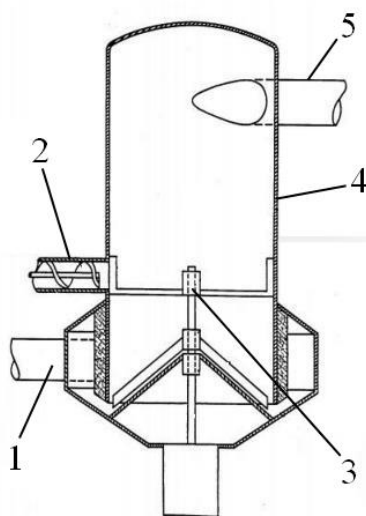
- 1 – нагнітаючий вентилятор; 2 – калорифер; 3 – живильник для вологого матеріалу; 4 – сушильна камера; 5 – дисковий диспергатор;  
6 – привід диспергатора; 7 – відцентровий сепаратор;  
8 – рукавний фільтр; 9 – витяжний вентилятор

Рисунок 1.6 – Вихрова сушильна установка для пастоподібних та порошкоподібних матеріалів

Недоліками є: 1) необхідність тримати високу температуру теплоносія на виході із сушильної камери для забезпечення прискорення процесу досушування та низької залишкової вологості матеріалу; 2) значні

енергозатрати на обертання дискового ротора диспергатора; 3) значний гідравлічний опір апарату, що створює відцентровий сепаратор.

На рисунку 1.7 зображено лопатевий сушильний апарат із вихровим шаром продукту [17]. Характерною особливістю таких апаратів є наявність лопатевого ротора в нижній частині сушильної камери, де, радіально, відбувається підведення нагрітого теплоносія через пористу циліндричну стінку. Патрубок для відведення відпрацьованого теплоносія із висушеним матеріалом розміщений у верхній частині сушильної камери.



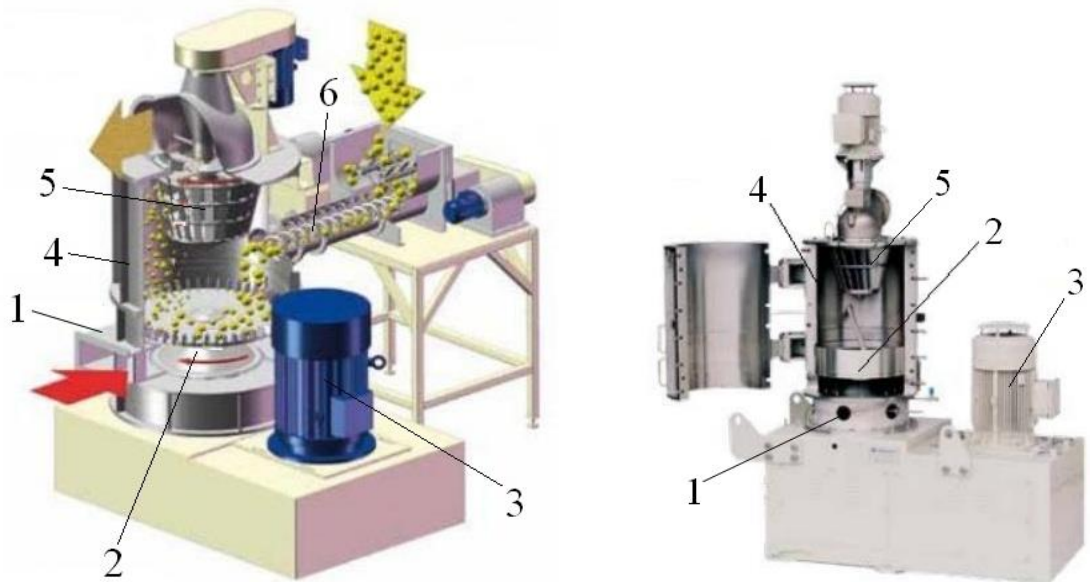
1 – патрубок подачі теплоносія; 2 – живильник для подачі вологого матеріалу; 3 – лопатевий диспергатор; 4 – сушильна камера; 5 – патрубок відведення запиленого відпрацьованого теплоносія

Рисунок 1.7 – Схема лопатевого сушильного апарату із вихровим потоком теплоносія

Недоліком даного апарату є складність досушування тонкодисперсних частинок до досить низької залишкової вологості внаслідок малого часу перебування матеріалу в сушильній камері. Такий апарат можливо використовувати лише для видалення поверхневої вологи.

На рисунку 1.8 представлені сушильні апарати типу «Флеш» [18,19], що характеризуються високою продуктивністю по волозі  $600 - 800 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}$  та малим часом перебування продукту в сушильній камері. Процес сушіння в них також відбувається в закрученому потоці теплоносія, що створюється за

допомогою ротора в нижній частині. Апарат складається із пристроїв для подачі вологого і виведення сухого продуктів, калориферу, сушильної камери із диском, на якому по периферії розміщені диспергуючі елементи для подрібнення вологого матеріалу, рукавного фільтру для очищення запиленого теплоносія від висушеного порошкоподібного матеріалу.



- 1 – патрубок подачі теплоносія; 2 – дисковий диспергатор;  
 3 – привід диспергатора; 4 – сушильна камера;  
 5 – відцентровий сепаратор; 6 – живильник-дозатор вологого матеріалу

Рисунок 1.8 – Сушильні апарати типу «Флеш»

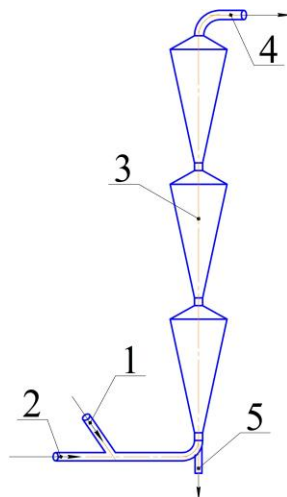
Перевагою даного апарата є те, що він забезпечує подрібнення часток продукту до заданого розміру і унеможливлення потрапляння крупних частинок в рукавний фільтр через відцентровий сепаратор, який знаходиться у верхній частині сушильної камери.

Недоліком таких установок є значні енергозатрати на обертання диску, що знаходиться в нижній частині сушильної камери та збільшений гідравлічний опір відцентрового сепаратору.

Область застосування аерофонтанних сушарок, одна із модифікацій яких представлена на рис. 1.9 [19], аналогічна сушаркам із прохідним киплячим шаром ПКШ. Такі апарати не мають газорозподільних пристроїв і ротора, тому мають менший гідравлічний опір. При цьому їх застосування



обмежується лише для монодисперсного або слабо полідисперсного матеріалу, а конструкція має значні габаритні розміри та велику металоємкість. Крім того такі типи сушарок не дозволяють досягти низької залишкової вологості, шляхом видалення адсорбційно-зв'язаної води.

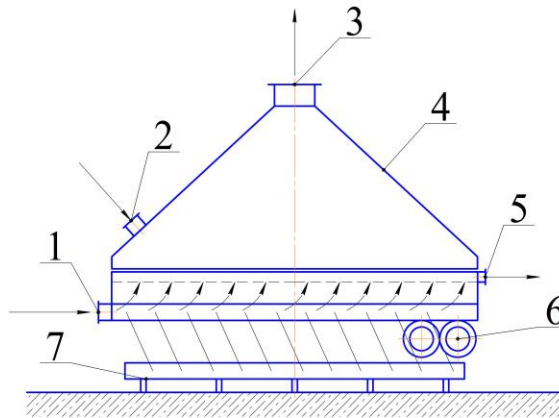


1 – патрубок для подачі вологого матеріалу; 2 – патрубок для подачі теплоносія; 3 – сушильна камера; 4 – патрубок для відведення суміші сухого матеріалу і відпрацьованого теплоносія; 5 – патрубок для вивантаження крупних частинок матеріалу

Рисунок 1.9 – Схема аерофонтанного сушильного апарату

Сушильні апарати з фонтануючим шаром (ФС) схожі за формою корпусу і відсутністю газорозподільного пристрою із аерофонтанними апаратами АЕ, але відрізняються від них гідродинамічним режимом. На відміну від АЕ, дисперсний матеріал не залишає робочу камеру в режимі пневмотранспорту, а приймає участь в циркуляційному потоці теплоносія. Сушильні апарати із фонтануючим шаром мають ряд переваг в порівнянні із іншими системами киплячого шару, наприклад, стійкість шару при високому показнику полідисперсності [1]. Проте в роботі [48] вказано складності в організації фонтануючого шару при розмірах частинок менше 1 мм. Крім того, недоліком такого типу апаратів являється мала продуктивність по випареній воді, всього  $100-150 \text{ кг}_в / \text{м}^3 \cdot \text{год}$ .

Сушильні апарати віброкиплячого шару ВКШ (рисунок 1.10) [20] працюють в режимі віброкиплячого шару, в якому дисперсний матеріал псевдозріджується, як під дією вібрації, що передається шару вібруючими елементами так і під дією гідродинамічних сил газового потоку. Сушарки даного типу спеціально призначені для сушіння тонкодисперсних матеріалів широкого гранулометричного складу, що схильні до адгезії.



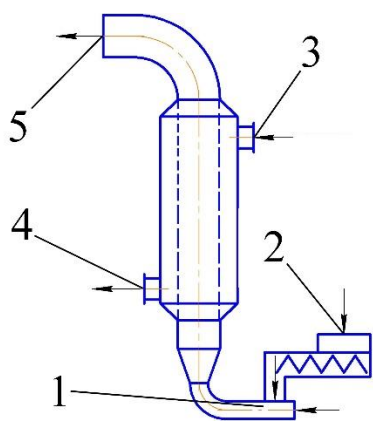
- 1 – патрубок для подачі теплоносія; 2 – патрубок для подачі вологого матеріалу; 3 – патрубок для відведення відпрацьованого теплоносія;  
4 – сушильна камера; 5 – патрубок для вивантаження сухого матеріалу;  
6 – вібратор; 7 – амортизатор

Рисунок 1.10 – Схема вібросушарки із віброкиплячим шаром

До недоліків вказаних апаратів відносяться: складність виготовлення, відносно невисока надійність, великі габарити і металоемкість, в також відносно низька питома продуктивність по видаленій волозі [51].

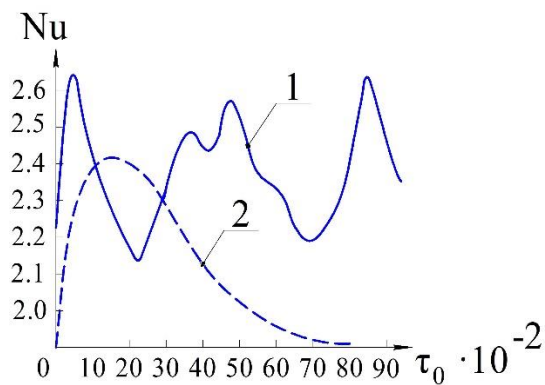
Сушильні апарати пневмотранспорту (ПТ), класична схема яких представлена на рис. 1.11 [21], відносяться до числа застарілих, що давно використовуються на практиці.

Зараз їх або комбінують із подрібнювачами, або забезпечують лініями рециркуляції матеріалу і теплоносія [40, 51, 56]. Час перебування матеріалу в таких сушарках дуже малий (максимально до декількох секунд [21]), при цьому, як показав аналіз, інтенсивність теплообміну швидко падає по довжині труби апарату.



1 – патрубки для подачі теплоносія;  
 2 – живильник для подачі вологого матеріалу;  
 3 – патрубок для подачі насиченої пари;  
 4 – патрубок для відведення конденсату;  
 5 – патрубок для відведення суміші сухого продукту і відпрацьованого теплоносія  
 Рисунок 1.11 – Схема пневмосушарки

На рис. 1.12 зображені результати розрахунку  $Nu = f(\tau)$  для сушарок пневмотранспорту і сушарок із закрученими зустрічними потоками (ЗЗП) різного діаметру при однакових витратах теплоносія і дисперсного матеріалу. Хвилеподібний характер кривої для сушарок із закрученими зустрічними потоками пояснюється збільшенням швидкості частинок відносно теплоносія в момент їх входу в зустрічний потік. Оскільки збільшення часу сушіння в ПТ зв'язано зі збільшенням довжини (висоти) труби і, відповідно, металоємкості установки, що економічно недоцільно.



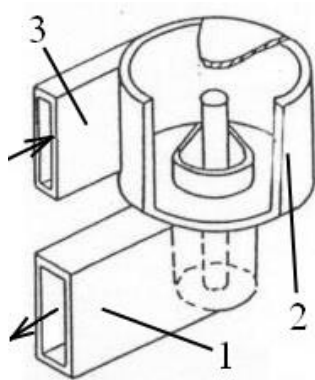
1 – для сушарок пневмотранспорту

2 – для сушарок із зустрічними закрученими потоками теплоносія

Рисунок 1.12 – Порівняльні криві розрахунків залежності  $Nu = f(\tau)$

Апарати вихрового шару ВШ, із закрученими потоками ЗП та із зустрічними закрученими потоками ЗЗП [51], відносяться до одного класу гідродинамічних режимів зваженого шару, оскільки в них потоки теплоносія та дисперсного матеріалу рухаються в порожнистому циліндричному або циліндрично-конічному корпусі і здійснюють обертальний або

спіралеподібний рух із-за тангенційного підводу або через газорозподільний пристрій, що забезпечує інтенсивне закручування потоків. На рисунках 1.13-1.14 представлені принципові схеми введення теплоносія в сушильну камеру для таких апаратів.



- 1 – патрубок для подачі теплоносія і вологого матеріалу;  
 2 – сушильна камера; 3 – патрубок для відведення сухого матеріалу і відпрацьованого теплоносія

Рисунок 1.13 – Схема введення теплоносія для вихрової сушарки системи «Конвекс»

На таких конструкціях сушарок неможливо сушити пастоподібні продукти через їх налипання на внутрішній поверхні сушильної камери. Вони мають меншу утримуючу здатність та гірше сепарують дисперсний матеріал у порівнянні із сушарками типу «Флеш» [51]. Вихрова камера (рисунок 1.14) відрізняється від вихрової камери системи «Конвекс» способом подачі волого продукту, який відразу змішується із теплоносієм. Але така конструкція також не підходить для сушіння паст через налипання матеріалу в сушильній камері.

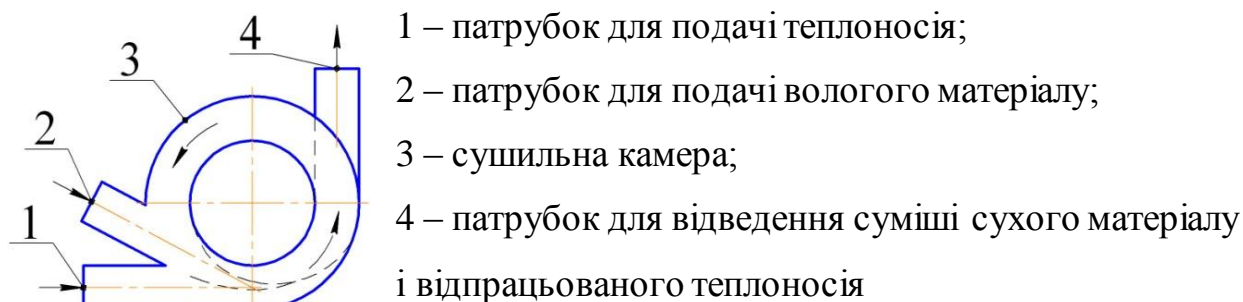
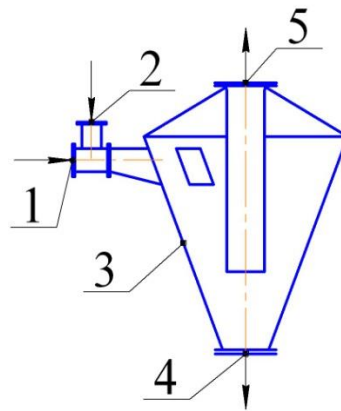


Рисунок 1.14 – Схема вихрової камери конструкції НИИХиммашу

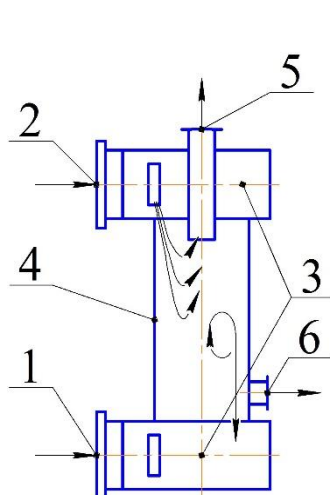
Циклонні сушарки (рисунок 1.15) [25] мають ряд недоліків, які полягають в утворенні грудок та налипання продукту на стінки апарату, а також значні енергозатрати на створення вихрового шару.



1 – патрубок для подачі теплоносія; 2 – патрубок для подачі вологого матеріалу; 3 – сушильна камера; 4 – патрубок для вивантаження сухого матеріалу; 5 – патрубок для відведення відпрацьованого теплоносія

Рисунок 1.15 – Схема циклонного сушильного апарату

Перевагою апаратів із зустрічними закрученими потоками (ЗЗП) (рисунок 1.16) [26] є можливість організації роботи сушарки із ефективністю пиловловлювання дисперсних частинок мінімального діаметру  $d_{\text{ч}} = 5..15$  мкм, до 98%, в результаті створення відносної швидкості потоків теплоносія відносно частинок матеріалу.



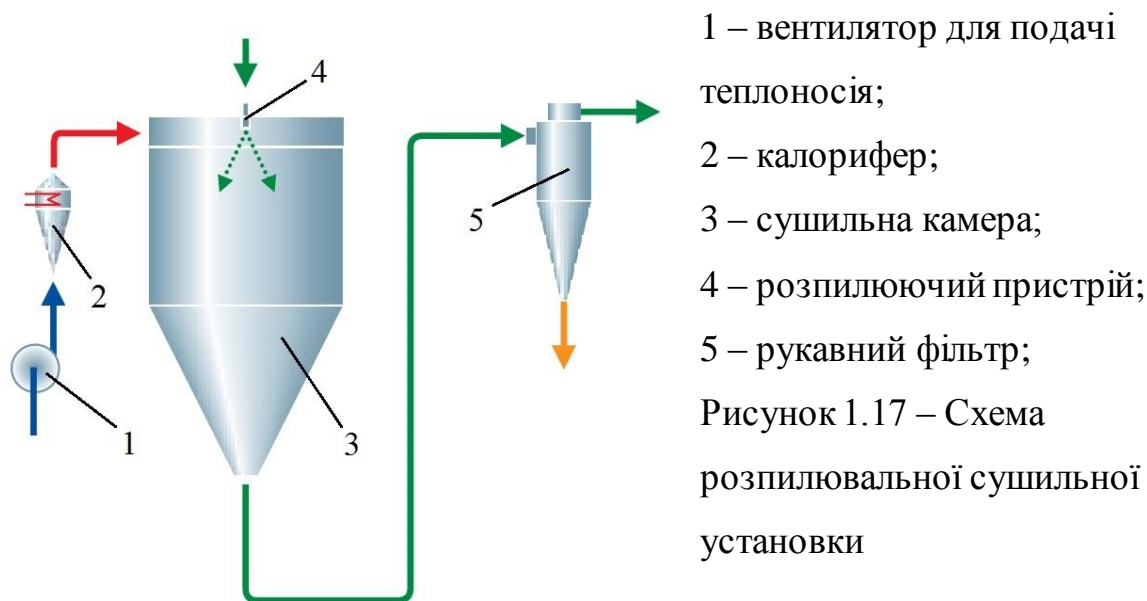
1 – патрубок для подачі теплоносія і вологого матеріалу; 2 – патрубок для подачі зустрічного потоку теплоносія; 3 – дифузор; 4 – сушильна камера; 5 – патрубок для відведення відпрацьованого теплоносія; 6 – патрубок для вивантаження сухого матеріалу

Рисунок 1.16 – Схема сушильного апарату із зустрічними закрученими потоками

Варто відмітити, що апарати ЗЗП мають найкращі показники по пиловловлюванню серед усіх інерційних відцентрових пиловловлювачів [38]. Але головними недоліками сушильних апаратів ЗЗП залишаються: 1)

налипання матеріалу в сушильній камері і неможливість сушити пастоподібні матеріали; 2) складність регулювання витрат вологого матеріалу.

Важливу роль в сушінні розчинів і суспензій відіграють розпилюючі сушарки. На рисунку 1.17 [27] зображена схема типової розпилюючої сушарки, особливістю роботи якої являється подача вологого матеріалу і теплоносія у верхню частину сушильної камери та виведення суміші відпрацьованого теплоносія разом із висušеним матеріалом через нижню частину камери у рукавний фільтр.



Недоліками розпилювального пристрою є неможливість сушіння пастоподібних матеріалів; значні енергозатрати, обумовлені необхідністю підтримувати високу температуру теплоносія на виході із сушильної камери; велика кількість води, що надходить із розчином або суспензією (70–80 %) і яку треба випаровувати.

Пневматичні спіральні сушарки (ПСС) зображені на рисунках 1.18-1.21 [28]. Спільним для цих апаратів являється забезпечення інтенсифікації тепломасообміну в потоках теплоносія і частинок матеріалу, що досягають збільшенням відносної швидкості руху частинок в теплоносії шляхом дії відцентрової сили на частинки матеріалу. На практиці цього досягають, закручуючи потік по гвинтовій траєкторії, як показано на рисунках 1.18, 1.19,

або по траєкторії плоскої спіралі, як показано на рис. 1.20, 1.21. В таких сушарках через зіткнення агломератів один із одним та із стінкою сушильної камери, а також через збільшення концентрації твердої фази утворюються стійкі застійні зони в каналах спіралі.

ПСС із гвинтовими вставками (рисунок 1.18) мають ряд недоліків, головними із яких являються: недостатня герметичність спіральних каналів, високий показник гідравлічного опору (до 20 кПа і більше [51]) та складність очищення внутрішньої поверхні апарату. ПСС містить:

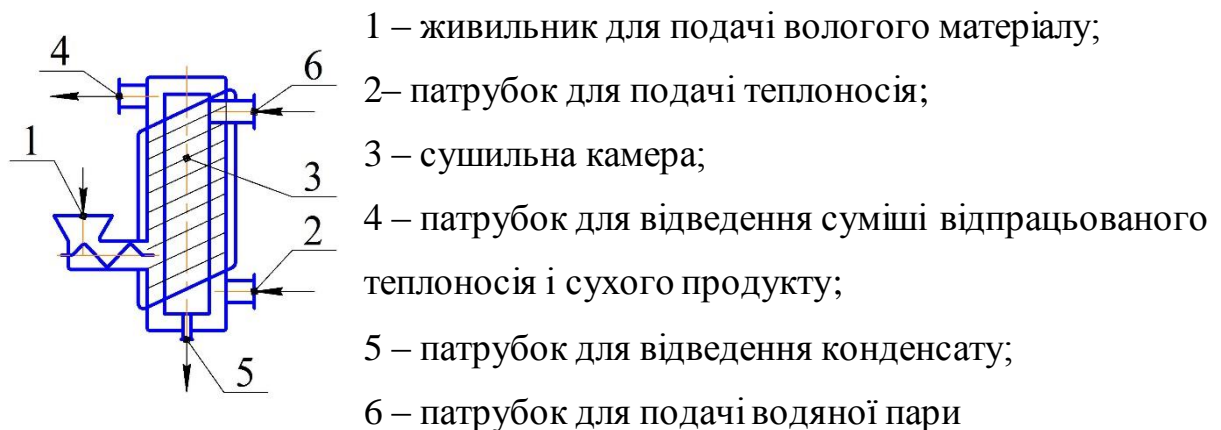


Рисунок 1.18 – Схема пневматичної спіральної сушарки у вигляді труби із гвинтовою вставкою

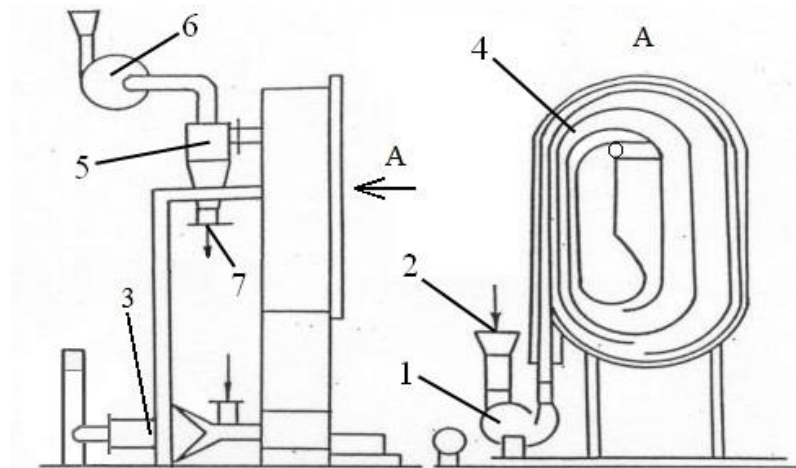
Основним недоліком сушильних апаратів із подвійною трубою і гвинтовою вставкою (рисунок 1.19) [29] є збільшені геометричні параметри і металоємкість установки. Крім того, матеріал, що налип на гарячі поверхні сушильної камери, пригорає.



Рисунок 1.19 – Схема сушарки із подвійною трубою і гвинтовою вставкою



Подача вологого продукту в пневмосушарці із плоским спіральним каналом (рисунок 1.20) відбувається разом із теплоносієм через спільний канал. Недоліками даної конструкції являється велика металоємкість конструкції та складність очистки плоского спірального каналу, в якому можливе налипання пастоподібних матеріалів.



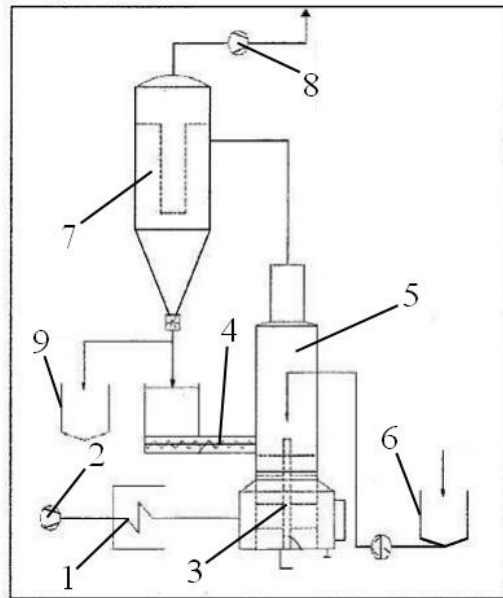
1 – нагнітаючий вентилятор; 2 – живильник для подачі вологого матеріалу; 3 – патрубок для подачі теплоносія; 4 – сушильна камера;  
5 – циклон; 6 – витяжний вентилятор; 7 – пристрій для вивантаження сухого матеріалу

Рисунок 1.20 – Схема пневмосушарки із плоским спіральним каналом фірми «Проктор-Марк»

На рисунку 1.21 зображена вихрова сушарка із інтенсивним випаровуванням води [30,31], в якій вологий матеріал припудрюється висушеним порошком, подрібнюється диспергаторами і сушиться у вихровому потоці теплоносія.

Перевагою даної установки є висока швидкість сушіння, можливість сушити високодисперсні пастоподібні матеріали. Недоліками є: 1. Низька кінцева сухість готового продукту; 2. Нерівномірне видалення води із продукту та полідисперсний його склад; 3. Великі енергозатрати внаслідок потреби тримати високу температуру теплоносія 200-300 °С на виході із сушильної камери, що необхідно для висушування матеріалу до низької кінцевої вологості 0,2 – 0,3 %.





- 1 – калорифер; 2, 8 – нагнітаючий і витяжний вентилятори відповідно;  
 3 – диспергатор; 4 – живильник для подачі сухого продукту;  
 5 – сушильна камера; 6, 9 – бункери для вологого і сухого матеріалу;  
 7 – рукавний фільтр

Рисунок 1.21 – Схема вихрової сушильної установки із інтенсивним випаровуванням вологи.

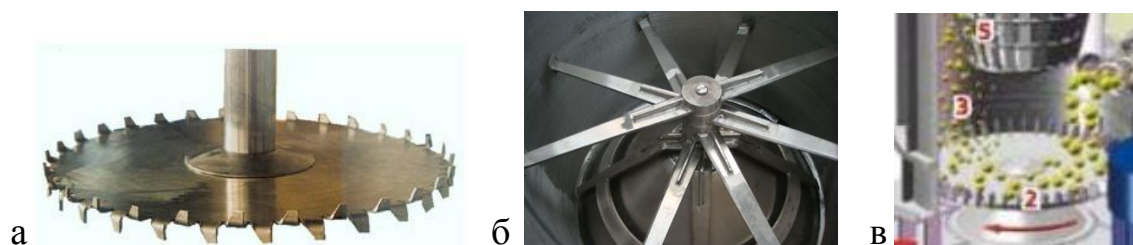
Аналіз використання сушильних апаратів для сушіння пастоподібних тонкодисперсних матеріалів дозволяє стверджувати, що дослідження застосування вихрових потоків для сушіння пасти діоксиду титану є актуальним.

#### 1.4 Аналіз конструкцій диспергаторів

В технології виробництва пігменту  $\text{TiO}_2$  процес подрібнення (диспергування) агломератів пасти є одним із дорогих та енергоємних процесів. Сучасна технологія отримання тонкодисперсного порошку передбачає розділення процесів сушіння і подрібнення матеріалу діоксиду титану. Це є наслідком збільшення енергозатрат на виробництво діоксиду титану. Вартість продукції діоксиду титану обернено пропорційна величині розміру тонкодисперсних частинок пігменту  $\text{TiO}_2$  [5], яка за вимогами

державних стандартів має бути не більше 15 мкм [6]. У зв'язку з цим ефективне подрібнення пігменту діоксиду титану є найважливішою операцією при основному виробничому процесі сушіння пасти  $\text{TiO}_2$ . Необхідні оптичні властивості тонкодисперсних частинок, а особливо – здатність розсіювання світла (диспергуюча здатність) – тим більше, чим більш тонко подрібнені частинки дисперсної фази. Оптимум величини розмірів частинок лежить в субмікронних діапазонах.

У сушильних апаратах псевдозрідженого шару для сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  найчастіше використовують наступні типи диспергаторів (рисунок 1.22 [7, 13-15]):



а – дисольвер; б – ножовий диспергатор; в – дисковий диспергатор

Рисунок 1.22 – Типи диспергаторів сушильних установок

Аналіз конструкцій сушильних установок псевдозрідженого шару із диспергуванням матеріалу [7-15] показує, що найбільше використання отримали ножові диспергатори, які мають переваги у порівнянні з іншими:

1. Запобігають налипанню продукту на поверхню камери;
2. Дозволяють працювати при великій кількості обертів ротора;
3. Мають значну швидкість і ступінь подрібнення матеріалу.

Дискові диспергатори і дисольвери, у порівнянні із ножовими, мають гірші показники по ефективності диспергування пастоподібних матеріалів внаслідок налипання на відкритій поверхні диску. Крім того, вони перекривають потік теплоносія, створюючи значний гідравлічний опір [9].

Отже, одними з найбільш важливих показників диспергатора є:

1. Забезпечення стійкої роботи сушарки;
2. Утворення монодисперсного потоку часток матеріалу мінімального діаметру;
3. Забезпечення всіх необхідних декоративних і захисних властивостей матеріалу;
4. Оптимальний

гідравлічний опір та закручування потоку теплоносія і псевдозрідженого шару часток матеріалу, що висушуються.

### **1.5 Гідродинаміка вихрових потоків та проблема організації активного гідродинамічного режиму**

Проблеми інтенсифікації тепло- і масообміну в сушильних апаратах в повній мірі вирішуються створенням активного гідродинамічного режиму. Ознакою справжнього активного гідродинамічного режиму є розвинута поверхня взаємодії фаз, гідродинамічна стійкість (стабільність гідродинамічної обстановки в часі по всьому об'єму сушильного апарату), наближення гідродинамічної моделі потоків в апараті до моделі ідеального витіснення, збільшення відносної швидкості руху фаз, зниження енергоємності процесу [13]. Збільшення ефективності пов'язане зі збільшенням міжфазних відносних швидкостей та збільшенням середнього коефіцієнта тепловіддачі. Найважливішим моментом математичного моделювання процесу сушіння в активному гідродинамічному режимі є моделювання гідродинаміки псевдозрідженого шару. Серед підходів, які застосовують в інженерній практиці для моделювання гідродинаміки, можна виділити два основних: опис рухомої системи частинок матеріалу із врахуванням їх взаємодії та апроксимація типовими чи комбінованими моделями [15-18]. Гідродинаміка вихрових потоків достатньо вивчена і широко представлена в літературі [1, 11, 18, 20, 44, 55].

Відомі рівняння, що визначають діапазон існування псевдозрідженого шару, а саме вирази [17, 56]:

$$K = v_{\text{вит}}/v_{\text{кр}}, Re_{\text{кр}}, Re_{\text{вит}}, \quad (1.3)$$

де  $Re_{\text{кр}}$  і  $Re_{\text{вит}}$  – значення числа Рейнольдса, що відповідає початку псевдозрідження і виносу матеріалу відповідно;  $v_{\text{кр}}$  і  $v_{\text{вит}}$  – швидкості частинок матеріалу на початку псевдозрідження і витання відповідно.

Залежність 1.3 актуальна лише для частинок матеріалу із постійним еквівалентним розміром протягом процесу сушіння. В роботах [13, 14] розроблено розрахункове рівняння для визначення оптимального режиму руху теплоносія, який забезпечує рух дисперсного матеріалу:

$$Re_{\text{вит}} = K_t \cdot \frac{Ar \cdot (1 - \beta_{\text{об}})^{4,75}}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{(1 - \beta_{\text{об}})^{4,75}}}, \quad (1.4)$$

де  $Ar$  – число Архімеда;  $\beta_{\text{об}}$  – об'ємна концентрація дисперсного матеріалу;  $K_t$  – коефіцієнт запасу, що враховує зіткнення частинок між собою і із стінками камери, обертання частинок матеріалу, турбулентні пульсації.

Для киплячого шару отримано залежність 1.5 [20, 21], що дозволяє визначити затрати енергії теплоносія на підтримку твердих дисперсних частинок у зваженому стані:

$$\Delta p_{\text{ш}} = \int_0^{M_T} \frac{g}{S_{\text{ш}}} dM_T = \frac{M_T \cdot g}{S_{\text{ш}}}, \quad (1.5)$$

де  $\Delta p_{\text{ш}}$  – перепад тиску в киплячому шарі;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $S_{\text{ш}}$  – площа поперечного перетину шару;  $M_T$  – маса псевдозрідженого твердого матеріалу.

Рівняння 1.5 реалізовано для практичного використання у вигляді залежності 1.6 [21]:

$$\Delta p_{\text{шт}} = (\rho_T - \rho_{\text{г}}) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot H_0, \quad (1.6)$$

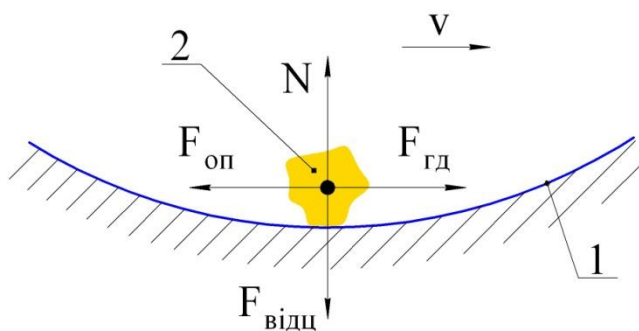
де  $\varepsilon_0$  – коефіцієнт порозності шару;  $H_0$  – початкова висота шару матеріалу.

Особливістю гідродинаміки вихрових апаратів є поєднання активного гідродинамічного режиму з тривалим, по відношенню до апаратів з гвинтовими потоками і пневмотранспортом, часом перебування дисперсного матеріалу в апараті. Поєднання цих двох чинників дозволяє проводити сушіння (або іншу термічну обробку) не тільки широкопористих, але і тонкопористих дисперсних матеріалів, що характеризуються наявністю як поверхневої, так і зв'язаної вологи. Крім того, у вихрових камерах можливе ефективне сушіння пастоподібних та сипучих дисперсних матеріалів.

Одними з найважливіших характеристик вихрових апаратів є їх утримуюча здатність, яка забезпечує середній час перебування дисперсного матеріалу в апараті, і структура потоків, що визначає час їх перебування в апараті.

Проблема утримуючої здатності вихрових апаратів розглядається в роботах [17] та [18]. У периферійній зоні сушильної камери рух потоку теплоносія має квазіпотенціальний характер, при якому його осьова складова швидкості зростає від стінок камери до її центру. У центральній зоні камери характер руху газового потоку змінюється і перетворюється на прямолінійний потік теплоносія [7].

При подачі дисперсного матеріалу в сушильну камеру характер руху газового потоку істотно змінюється. Тверді дисперсні частинки, що вводяться у вихрову камеру, захоплюються газовим потоком в обертальний рух і відкидаються в периферійну зону камери, де рухаються по колу вниз на внутрішній поверхні стінки (рисунок 1.23). В результаті в нижній частині сушильної камери накопичується дисперсний матеріал у вигляді кільцевого обертального шару [24].



1 – стінка сушильної камери; 2 – частинка матеріалу;

$F_{гд}$  – сила гідродинамічного напору руху теплоносія;

$F_{відц}$  – відцентрова сила;  $F_{оп}$  – сила опору;  $N$  – реакція стінки

Рисунок 1.23 – Сили що діють на частинку матеріалу при русі у вихровому потоці теплоносія

Сила опору  $F_{оп}$  виникає в результаті співударання частинок одна об одну і об стінку камери. У початковий момент формування шару матеріалу

тверді частинки певного розміру не можуть покинути вихрову камеру разом із потоком відпрацьованого теплоносія, оскільки відцентрова сила  $F_{\text{відц}}$ , що діє на частинку, перевищує силу тиску радіального потоку, спрямованого до центру камери.

Однак, у міру накопичення дисперсного матеріалу в периферійному кільцевому шарі камери, швидкість його обертання зменшується, що призводить до зниження величини відцентрової сили, що діє на частинки. В результаті настає стан рівноваги, коли відцентрова сила і сила тиску радіального потоку зрівнюються, і стає можливим винесення дрібних твердих частинок з камери разом з потоком теплоносія. Якщо в якийсь момент часу з кільцевого шару буде винесено надмірну, по відношенню до умов рівноваги, кількість дисперсного матеріалу, то швидкість руху твердих частинок, а отже і відцентрова сила, знову збільшиться, в результаті чого винос матеріалу припиниться. Таким чином, при певній витраті газу вихрова камера буде утримувати певну кількість дисперсного матеріалу  $q$  (утримуюча здатність камери) [22].

Нгуен Тронг Зань, за результатами своїх досліджень отримав наступну залежність для розрахунку критичної швидкості газового потоку при транспортуванні дисперсного матеріалу у вихровій камері [7]:

$$Re_{\text{кр}} = \left( \frac{W_{\text{ВХ}} \cdot D_{\text{ВХ}}}{\nu} \right) = 4.65 \cdot 10^{-4} \cdot Re_B^{0.2} \cdot \left( \frac{H-h}{H} \right)^{-2.68} \cdot \left( \frac{H-h_1}{H} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{D_{\text{ВХ}}}{D_{\text{ВК}}} \right) \quad (1.7)$$

При цьому інтервал параметрів варіювався наступним чином:

$$Re_B = 23 - 550, \frac{H-h}{H} = 0.6 - 1, \frac{H-h_1}{H} = 0.4 - 0.8, \quad (1.8)$$

де  $Re_B$  – критерій Рейнольдса при витанні частинок;  $W_{\text{ВХ}}$  – швидкість потоку у вхідному патрубку, м/с;  $D_{\text{ВХ}}$  – діаметр вхідного патрубку, м;  $\nu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  $H$  – висота камери, м;  $h$  – висота підпорної перегородки, м;  $h_1$  – висота переливного порога, м.

Також була отримана залежність утримуючої здатності вихрової камери у наступному вигляді [8]:

$$q = 3.2 \cdot Re_{\text{АП}}^{-0.28} \cdot Re_B^{1.12} \cdot Fr_{\text{Ц}}^{0.33} \cdot k_B^{-0.68} \cdot \left( \frac{D_{\text{ВХ}}}{D_{\text{ВК}}} \right)^{0.08} \cdot \left( \frac{H-h}{H} \right)^{-1.36} \cdot \left( \frac{H-h_1}{H} \right)^{-0.41} \quad (1.9)$$

При цьому розрахунковий інтервал параметрів варіювався наступним чином [8]:

$$\begin{cases} Re_{АП} = (5 - 27) \cdot 10^3, Re_B = 23 - 550, Fr_{ц} = 30 - 2350 \\ k_B = 0.6 - 1, \frac{D_{ВХ}}{D_{ВК}} = (9.57 - 15.65) \cdot 10^{-2} \\ \frac{H-h}{H} = 0.6 - 1, \frac{H-h_1}{H} = 0.4 - 0.8 \end{cases} \quad (1.10)$$

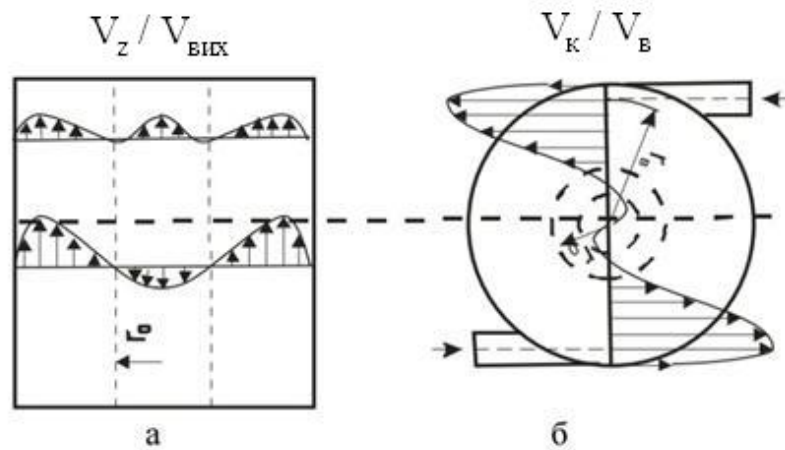
Також, однією з проблем сушильних апаратів є велика дисперсія полів швидкостей і температур, що зумовлено конструкцією сушильної камери та способом подачі матеріалу і теплоносія відповідно [16].

Велика дисперсія полів швидкостей є однією із характеристик вихрових сушильних апаратів, що зумовлюються принципом їх роботи, проте ця характеристика має також негативні наслідки. За результатами роботи [9] можна сказати, що технологічний процес сушіння у вихровому апараті протікає таким чином, що високотемпературний теплоносій в розгінному каналі змішується з вологим матеріалом, утворюючи гетерогенне середовище. В результаті безпосереднього контакту зовнішньої поверхні матеріалу із теплоносієм зв'язана волога матеріалу переходить у водяну пару, змішується з високотемпературним теплоносієм і надходить у вихрову камеру, а після завершення технологічного процесу сушіння разом із готовим продуктом залишає її. Кінцева вологість матеріалу визначається часом перебування продукту у вихровій камері та величиною густини теплового потоку теплоносія. Як перший, так і другий показники зумовлюють швидкість виносу готового продукту з камери після досягнення нею заданої вологості.

Тобто, у вихровому потоці з усіх складових складного теплообміну домінує конвективний теплообмін [9], обумовлений великими відносними швидкостями твердої фази гетерогенного потоку, через що рух суміші у вихровому сушильному апараті являє собою складний аеродинамічний процес, який визначається рядом факторів, основними з яких є наступні:

- геометричні розміри та форма апарата;
- теплофізичні параметри вхідного і кінцевого продуктів.

Результати досліджень були оброблені, проаналізовані і представлені у вигляді кривих розподілу складових швидкостей вихрового руху гетерогенного потоку по радіусу і висоті камери (рисунок 1.24 а і б) [17].



а – поля осьових швидкостей; б – поля тангенціальних швидкостей;

$V_k$ ,  $V_z$  – відповідно колова і осьова швидкості вихрового потоку;

$V_{вих}$ ,  $V_в$  – відповідно вихідна і вхідна швидкості потоку

Рисунок 1.24 – Розподіл складових швидкостей вихрового руху гетерогенного потоку по радіусу і висоті камери

З рисунка 1.24 видно, що розподіл осьових швидкостей по перетину вихрового апарату на вході в робочу область має хвилясту структуру. Від стінок до центру камери швидкості зростають від нуля до максимальної величини, після чого вони знижуються, досягаючи мінімальної величини.

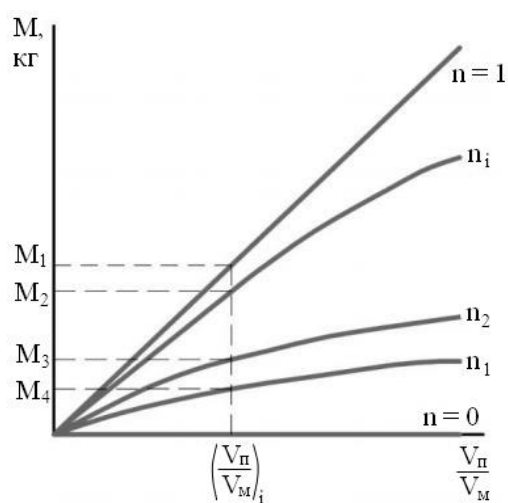
У центральній частині апарату виникає зворотний потік гетерогенної суміші, обумовлений падінням осьової швидкості, що приводить до зниження ефективності процесу сушіння (рисунок 1.24а). Надалі відбувається вирівнювання швидкостей.

Сучасні сушильні апарати реалізують початковий період процесу сушіння як при прямотоці (рух матеріалу і теплоносія спрямовані в одну сторону), так і при протитоці (рух матеріалу і теплоносія спрямовані в різні сторони). У кінці процесу – сушіння протікає більш інтенсивно при протитоці. Температура матеріалу в кінці процесу сушіння при прямотоці



наближається до температури теплоносія, що негативно впливає на коефіцієнти швидкості сушіння [13].

Також відомо [9], що при збільшенні потоку теплоносія, його швидкість при незмінних геометричних параметрах сушильного апарату буде зростати та інтенсифікувати процес сушіння, що зображено на рисунку 1.25 [9]. Співвідношення  $\frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{м}}}$  можна отримати із матеріального балансу процесу сушіння тонкодисперсного матеріалу.



$\frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{м}}}$  – відношення витрат повітря і

дисперсного матеріалу;  $M$  – кількість видаленої вологи, кг;  $n = 0..1$  –

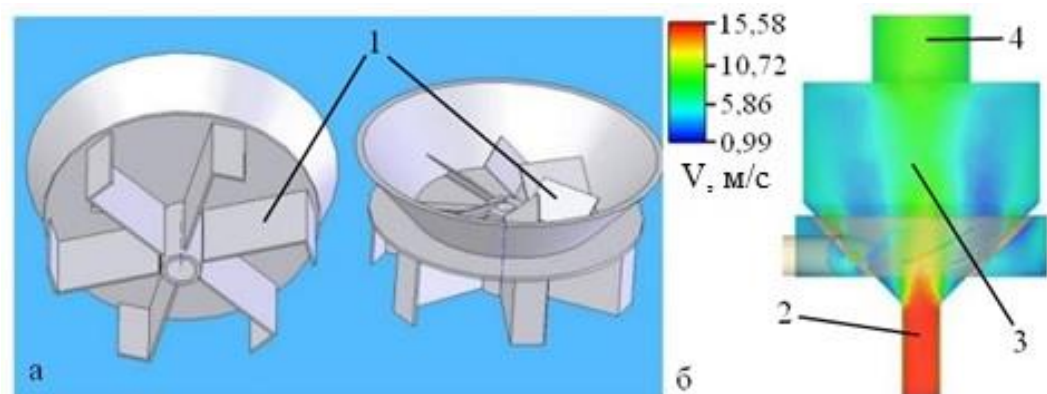
емпіричний показник, що враховує

конфігурацію сушильної камери ( $n_2 > n_1$ )

Рисунок 1.25 – Вплив відношення витрат повітря  $V_{\text{п}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$  і дисперсного матеріалу  $V_{\text{м}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

на кількість видаленої вологи  $M$ , кг.

В роботі [10] розглянуто конструкцію дифузору, що розподіляє потік теплоносія (рисунок 1.26а) та отримані поля швидкостей  $V$ , м/с для сушильної камери вихрового типу (рисунок 1.26б).



1 – направляючі пластини; 2 – патрубок подачі теплоносія;

3 – сушильна камера; 4 – патрубок відведення теплоносія

Рисунок 1.26 – Дослідження полів швидкостей потоків теплоносія у вихровій камері

На рисунку 1.26 видно, що на периферії верхньої частини сушильної камери 3 утворюються застійні зони, в яких швидкість потоку теплоносія і його температура, внаслідок випаровування вологи з твердої фази у теплоносії, значно зменшуються. Це значно уповільнює процес сушіння, коли лімітуючим фактором є величина теплового потоку теплоносія, що підведений до матеріалу.

## 1.6 Сучасні методи описання тепломасопереносу у вихровому шарі

Загальний метод аналізу процесу сушіння дисперсних матеріалів у вихрових потоках теплоносія базується на аналітичному або чисельному вирішенні диференціальних рівнянь тепломасопереносу, із урахуванням зміни параметрів сушильного агента по довжині апарату [52]. Розподіл теплової енергії і вологи, для окремої частинки, по довжині сушильного апарату завжди являється комплексною задачею зовнішнього і внутрішнього тепломасопереносу, що є досить складною і вимагає значних зусиль на обчислення [53]. Більш простий підхід до знаходження зміни параметрів системи базується на використанні межової задачі. Система рівнянь тепломасопереносу, що записується в рамках межової задачі в самому загальному вигляді представлена системою рівнянь [49]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial a_m}{\partial r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left( \delta \frac{\partial a_m}{\partial r} + a \frac{\partial \delta}{\partial r} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_T \rho_T} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{c_T \rho_T} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\varepsilon r}{c_T} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \end{cases}, \quad (1.11)$$

де  $a, a_m$  – відповідно теплопровідність і вологопровідність;

$\Gamma$  – коефіцієнт форми частинок матеріалу.

У випадку, коли градієнтом тиску та похідними від  $a(T, U)$  і  $a_m(T, U)$  можна знехтувати, рівняння внутрішнього тепломасопереносу в сферичній системі координат записують у вигляді [52]:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_m} \cdot \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + 8 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon r}{c_T} \cdot \frac{\partial U}{\partial T} \end{cases} \quad (1.12)$$

Цю задачу вирішують із дотриманням умов симетрії внутрішніх полів вологовмісту і температури в частинках матеріалу:

$$\frac{\partial U(\tau, 0)}{\partial r} = \frac{\partial T(\tau, 0)}{\partial r} = 0, \quad (1.13)$$

а форму частинок матеріалу приближають до канонічної:  $\Gamma = 0, 1, 2$ . Для сфери беруть  $\Gamma = 2$ . В свою чергу залежність 1.13 потребує експериментальної перевірки.

Задача 1.12 має аналітичне рішення при умові лінійності рівнянь системи, тобто при  $a, a_m = \text{const}$ . Початкові умови  $T(\tau_0, r) = T_0 = \text{const}$ ;  $U(\tau_0, r) = U_0 = \text{const}$  у задачі представляють у двох варіантах [11]:

- у випадку, коли вихідний матеріал поступає на сушіння без попередньої термообробки:

$$\begin{cases} T(0, r) = T_{\text{ц}} + (T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}) \cdot \frac{r^2}{R^2} \\ U(0, r) = U_{\text{ц}} + (U_{\text{п}} - U_{\text{ц}}) \cdot \frac{r^2}{R^2} \end{cases} \quad (1.14)$$

- коли частинки поступають на сушіння після закінчення першого періоду процесу сушіння.

Тут індекс «ц» означає розміщення точок всередині вологих частинок матеріалу, а «п» – на їх поверхні.

Граничні умови для системи рівнянь 1.12 прийнято формулювати у вигляді рівності потоків вологи  $j_n$ , спочатку до зовнішньої поверхні частинки із середини її об'єму, а потім від зовнішньої поверхні в об'єм потоку теплоносія за рахунок конвективної масовіддачі [52]:

$$-a_m \rho_T \left( \frac{\nabla U}{n} + \delta \frac{\nabla T}{n} \right) = j_n, \quad (1.15)$$

$\rho_T$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>.

При цьому вираз для потоку вологи  $j_n$ , для першого періоду сушіння записують відповідно моделі нерухокої плівки [24] у вигляді:

$$j_n = \beta(P_s - P), \quad (1.16)$$

де  $P_s$  – тиск насиченої пари, МПа;  $P$  – парціальний тиск водяної пари, МПа;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, що віднесений до різниці парціальних тисків водяної пари,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}}$ .

Для другого періоду сушіння потік води  $j_n$  від поверхні частинок матеріалу записують наступним чином [18]:

$$j_n = \beta \rho_T (U_n - U_*) = K \rho_T R (\bar{U} - U_*), \quad (1.17)$$

де  $K$  – коефіцієнт швидкості сушіння;  $U_*$  – рівноважний вологовміст;  $R$  – відношення загальної зовнішньої поверхні матеріалу до його об'єму.

В якості граничних умов теплообміну при сушінні тонкодисперсних матеріалів у вихрових потоках теплоносія записують умови конвективного теплообміну між потоком сушильного агента і поверхнею вологого матеріалу [1, 52, 53, 64]. При цьому розрахунок кондуктивної складової, зв'язаної із контактом частинок різної температури, проводиться за допомогою коефіцієнта теплообміну –  $a$ , що отримано емпіричним шляхом [19]:

$$a(t_c - T_n) = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_n + (1 - \varepsilon^* r j_n), \quad (1.18)$$

де  $t_c$  – температура теплоносія;  $r$  – питома теплота пароутворення. Але в даному рівнянні не показано мінімальні і максимальні значення  $\varepsilon$  і  $j_n$  і як змінюється температура матеріалу під час сушіння.

Величина  $t_c$  визначається із рівняння теплового балансу для випадків прямо- і протитечійного руху потоків сушильного агента і матеріалу [52]:

$$t_c = t_m \pm (1 + R_B) r \frac{(U_0 - \bar{U})}{\chi c_T}, \quad (1.19)$$

де  $t_m$  – температура матеріалу;  $\chi$  – коефіцієнт швидкості сушіння;  $c_T$  – питома теплоємність теплоносія;  $R_B$  – критерій, що визначається із виразу 1.20;

$$R_B = (c_T + c_B U) \frac{dT}{r_c |dU|} \quad (1.20)$$

Розглянемо задачу, коли всередині частинки можна знехтувати термоградієнтним переносом води ( $\delta = 0$ ). В цьому випадку система

диференційних рівнянь внутрішнього тепломасопереносу для частинки матеріалу має вид [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \cdot \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (1.21)$$

В рівнянні 1.21 не вказано вплив швидкості сушіння матеріалу на зміну температури теплоносія і матеріалу. Межові умови автор записав окремо для першого і другого періодів процесу сушіння. Для періоду постійної швидкості сушіння межові умови записано у вигляді:

$$\alpha(t_c - T_m) = \frac{r}{F} \cdot \frac{dM}{d\tau}, \quad (1.22)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $F$  – площа поверхні частинки,  $\text{м}^2$ ;

$\frac{dM}{d\tau}$  – швидкість процесу сушіння, що визначається експериментально.

Умова масообміну при цьому записується у вигляді:

$$-a_m \rho_T \left[ \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right] = \beta (P_s - P) \quad (1.23)$$

Для періоду спадаючої швидкості сушіння межові умови записано наступним чином [3]:

$$\alpha(t_c - T_n) = \lambda_T \frac{\partial T(\tau, R)}{\partial r} + r(1 - \varepsilon) \rho_T a_m \frac{\partial U(\tau, R)}{\partial r}, \quad (1.24)$$

$$-a_m \rho_T \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_n = \beta \rho_v [U(\tau, R) - U'], \quad (1.25)$$

де  $U'$  – вологовміст в потоці теплоносія, що віддалено від поверхні матеріалу.

Початкові умови мають вигляд:

$$\begin{cases} T(0, 0 \leq r \leq R) = T_n \\ U(0, 0 \leq r \leq R) = U_n \end{cases} \quad (1.26)$$

Кінець першого періоду сушіння в роботі [48] визначається за допомогою величини швидкості сушіння середньої по об'єму частинки на основі експерименту, що може бути неточно.

Найбільш просто вирішується задача сушіння дисперсного матеріалу в незначному діапазоні температур, коли всередині частинок майже повністю

відсутній градієнт температури і градієнт вологовмісту, а випаровування вологи відбувається тільки із зовнішньої поверхні матеріалу [54]. В такому випадку із системи рівнянь (1.12) записують тільки спрощене рівняння нестационарної масопровідності, при  $\Gamma = 2$  [44]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (1.27)$$

В основному всі представлені задачі вирішені аналітично [44], при умові їх лінійності, тобто при сталих коефіцієнтах рівнянь (1.11-1.27). У випадку нелінійності рівнянь любого роду [16], задачі вирішують в основному за допомогою чисельних методів.

Щоб отримати числові значення невідомих величин, необхідно визначити величини або вирази для всіх коефіцієнтів рівнянь і межових умов для них, тобто  $a_m$ ;  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\lambda$ ;  $c_T$ ;  $B$ ;  $\beta$ ;  $c_B$ . Коефіцієнт масопровідності  $a_m$  для різних матеріалів експериментально визначають одним із двох методів [49]:

- стаціонарним або нестационарним, в якому коефіцієнт масопровідності обчислюється по основному рівнянню масопровідності:  $\bar{i} = -a_m \overline{grad c}$ ;
- стаціонарним або нестационарним, в якому  $a_m$  визначається із рішень диференціального рівняння масопровідності.

Коефіцієнти теплопровідності  $\lambda$  і  $\alpha$  є основним тепловим параметром для процесів теплопровідності при неустановленому режимі, оскільки характеризує відношення між тепловими властивостями матеріалу: здатністю проводити тепло і здатністю акумулювати його.

В дослідженнях масотеплообміну у вихрових потоках теплоносія використовують різні методи визначення коефіцієнтів тепло- і масопередачі. Це експериментальні методи, представлені у відомих роботах [1, 3, 11, 18, 52, 64], експериментально-теоретичні та чисто теоретичні, які можна знайти в роботах [47, 48]. Для систем тверда фаза – газ в дослідках масовіддачі використовують наступні практичні прийоми [52]: застосування сублімуючих матеріалів, застосування порожнистих капілярних тіл із

спеціальним підводом рідини і реалізації періоду постійної швидкості сушіння. У всіх випадках при цьому прагнуть до того, щоб масообмін систем відбувався в умовах дифузії вологи.

Запропонований спосіб [53] наближеного аналітичного розрахунку модифікованого коефіцієнту масовіддачі  $\beta_c$ , що не потребує експерименту. При цьому  $\beta_c$  визначається із рівняння [52]:

$$K_n \left( \frac{\partial c}{\partial r} \right)_n = \beta_c^* (c_n - c_p^*), \quad (1.28)$$

де індекс  $n$  відноситься до поверхні матеріалу;  $c$  – до сушильного агенту;  $p$  – до рівноважного стану;  $K$  – коефіцієнт масопровідності.

Рівноважний коефіцієнт  $\beta_c^*$  зв'язаний із  $\beta_c$  (коефіцієнтом масовіддачі) виразом:

$$\beta_c^* = \frac{\beta_c}{\mu A_p}, \quad (1.29)$$

де  $A_p$  – коефіцієнт розподілення функції рівноваги;  $\mu$  – хімічний потенціал.

Відомо велику кількість рівнянь масообміну між частинками матеріалу і теплоносієм, що отримані різними дослідниками із дослідів [44-45]. Коли кожна частинка омивається теплоносієм, відомі рівняння були опрацьовані по методу найменших квадратів за допомогою ПК, в результаті чого авторами роботи [44] було отримано узагальнююче рівняння:

$$Sh = 2 + 0,51 Re^{0,52} \cdot Sc^{0,33}, \quad (1.30)$$

де  $Sh = \frac{\beta_c d}{D}$  – критерій Шервуда;  $Re = \frac{w d}{\vartheta}$  – критерій Рейнольдса;  $Sc = \frac{\vartheta}{D}$  – критерій Шмідта;  $w$  – міжфазна відносна швидкість;  $\vartheta$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості;  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Рівняння 1.30 апроксимує експериментальні дані на досить великому діапазоні зміни  $Re = 0 \dots 70000$ .

Послідовний аналіз методів визначення коефіцієнтів тепло- і масопередачі дозволив вибрати найбільш доцільний для сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану  $TiO_2$ .

Зупинимось на експериментальному методі, що базується на аналізі кривої сушіння пасти діоксиду титану для першого періоду, що застосовується до зони диспергації пасти в сушильній камері установки, і на використанні рівнянь 1.16-1.17. Зроблений вибір пояснюється наступними причинами: для зони диспергації характерна доволі складна кінематика взаємного руху потоків сушильного агенту і матеріалу, що зв'язана із криволінійністю траєкторій руху і наявністю циркуляції матеріалу в сушильній камері.

Коефіцієнт масовіддачі можна отримати в результаті обробки кривої сушіння пасти за допомогою кінетичного рівняння [55]:

$$G \frac{dU}{d\tau} = K(U_{\pi} - U)(U - B), \quad (1.31)$$

де  $G$  – маса матеріалу, що висушується, що відноситься до одиниці поверхні матеріалу, або на одиницю робочої поверхні апарату;  $U$  – поточний вологовміст;  $\tau$  – час сушіння;  $K$  – константа швидкості сушіння;  $U_{\pi}$  – початковий вологовміст;  $B$  – кінцевий (рівноважний) вологовміст матеріалу, який задається умовами задачі.

Між константою швидкості сушіння  $K$  і коефіцієнтом масопередачі  $\beta$  для другого періоду сушіння існує зв'язок у вигляді:

$$\beta = K(U_{\pi} - B), \quad (1.32)$$

Коефіцієнт  $\beta$  визначаємо після розрахунку  $K$ . В свою чергу  $K$  запропоновано шукати, як кут нахилу в системі координат  $\tau - z$ , де  $z = \ln \left[ \frac{(U_{\pi} - U)(A - B)}{(U_{\pi} - A)(U - B)} \right]$ ,  $A$  – початковий рівноважний вологовміст матеріалу.

Запропоновані рівняння, що базуються на обробці кінетичної кривої сушіння, на наш погляд, являються найбільш доцільними в даному випадку, тобто вони найбільш адекватно визначають кінетичні коефіцієнти тепло- і масопередачі.



## Висновки до розділу 1

Споживання тонкодисперсного пігменту діоксиду титану зростає, що вимагає збільшення обсягів виробництва та значних витрат на процес видалення вологи із пасти  $\text{TiO}_2$ .

Діоксид титану є важливою складовою паперу, фарб-емалей, лаків та різних покривних матеріалів. Тому від його механічних та технологічних характеристик найбільше залежить якість пофарбованих поверхонь.

Збільшення темпів виробництва тонкодисперсного порошку  $\text{TiO}_2$  може обмежуватись процесом сушіння. Важливим методом інтенсифікації сушіння є застосування вихрових потоків теплоносія та безперервне диспергування продукту в процесі сушіння.

Встановлено, що за допомогою сучасних сушильних апаратів можна досягти високої залишкової сухості матеріалу до 99,7% та зменшити час сушіння.

Для вирішення поставлених задач важливого значення набуває математичне моделювання процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  у вихрових потоках теплоносія із застосуванням подрібнення матеріалу, що дозволяє на основі числового моделювання здійснювати обґрунтований вибір параметрів обладнання і режимів процесу.

Аналіз тенденцій розвитку процесу та сушильного обладнання для пастоподібних матеріалів дозволяє зробити такі висновки:

1. На сучасному етапі розвитку обладнання і технології виробництва порошкоподібних продуктів лімітуючою стадією є сушіння.
2. Вихровий шар теплоносія і частинок матеріалу широко впроваджують у процеси сушіння.
3. Існуючі математичні моделі процесу сушіння пастоподібних матеріалів, в тому пасти діоксиду титану, здебільшого описують кондуктивно-конвективний спосіб передачі тепла [43-59].

4. Існуючі математичні моделі процесу сушіння пастоподібних продуктів, в тому числі пасти  $\text{TiO}_2$ , не дають змогу розрахувати процес сушіння у вихрових потоках теплоносія у зв'язку з відсутністю необхідних кінетичних закономірностей.

5. Відсутність діючої математичної моделі процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  вимагає виконувати експериментальні дослідження для визначення кінетичних закономірностей та технологічних параметрів.

6. Відсутність кінетичних закономірностей сушіння пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія унеможлиблює визначення його доцільності та інженерну реалізацію.

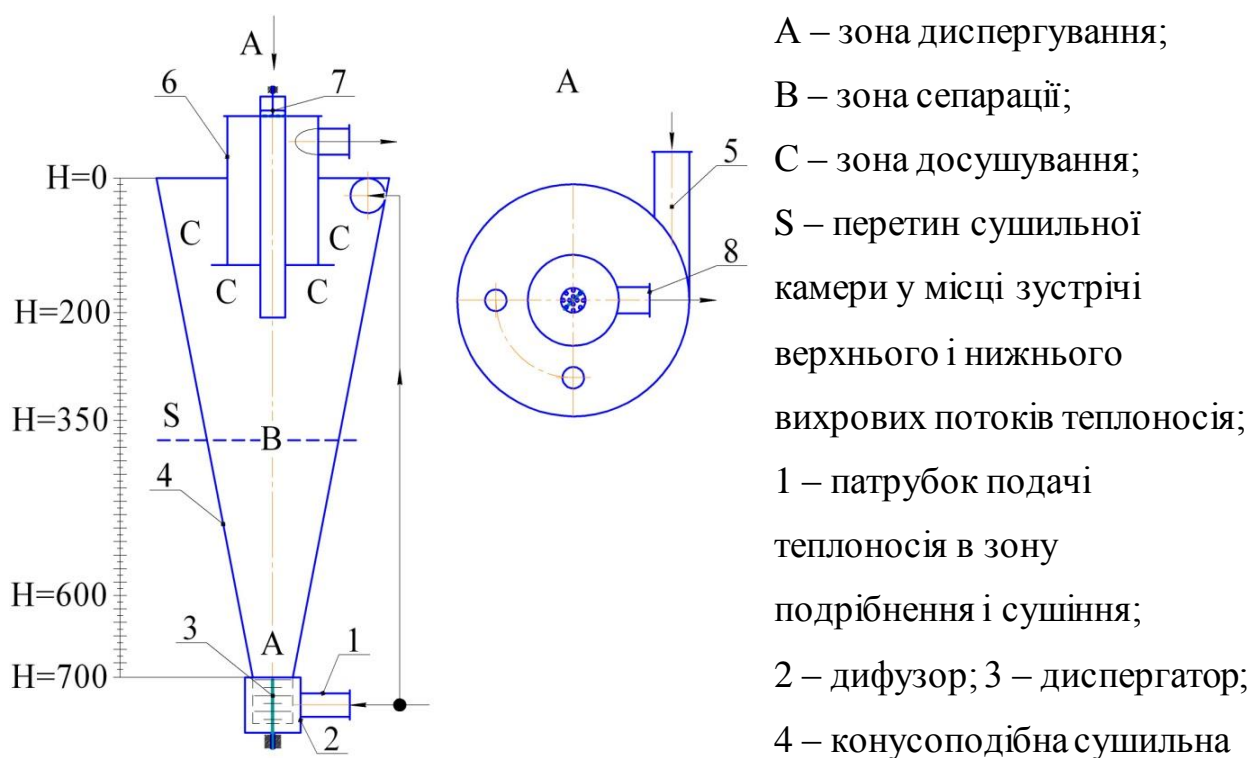
7. Використання ножових диспергаторів є найбільш ефективним для диспергування пастоподібних тонкодисперсних матеріалів.

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ

### 2.1. Теоретичне моделювання вихрових потоків теплоносія в сушильній камері

Метою теоретичного моделювання є визначення гідродинамічного режиму та розподілу полів тисків, тангенціальних і осьових швидкостей потоків теплоносія та положення зони їх зустрічі в об'ємі сушильного апарату. Від розміщення даної зони залежать умови процесу сепарації тонкодисперсних частинок від агломератів пасти  $\text{TiO}_2$ .

В даній частині роботи розглянуто гідродинаміку вихрових потоків теплоносія в сушильному апараті, схема якого зображена на рисунку 2.1.



камера; 5 – патрубок подачі теплоносія в зону досушування; 6 – патрубок виходу пило-газової суміші; 7 – живильник-дозатор; 8 – вихідний патрубок;

Рисунок 2.1 – Схема сушильного апарату для сушіння пастоподібних матеріалів

Даний сушильний апарат призначений для отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану, шляхом сушіння пастоподібного матеріалу  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія. Конструкція апарату дозволяє здійснювати: процес сушіння пасти із одночасним подрібненням її частинок, сепарацію потоку підсушених частинок та тонкодисперсного порошку і агломератів, процес досушування тонкодисперсного порошку у вихровому шарі у верхній частині апарату.

Перший потік теплоносія подається у нижню частину сушильної камери (рисунок 2.1) через патрубок 1 і дифузор 2, який розподіляє потік теплоносія і направляє його в диспергатор 3. Ножі ротора диспергатора закручують даний потік теплоносія у вихровий потік за напрямком обертання ножів. Одночасно у верхню частину сушильної камери (рисунок 2.1) тангенційно через патрубок 5 вводиться другий потік теплоносія на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$ . Результуючий потік теплоносія виводиться із сушильного апарату через патрубок 8.

Теоретичне дослідження виконано із застосуванням методів 3D інженерії та можливостей автоматизованої системи проектування та моделювання 3D CAD SOLIDWORKS 2017, а також її модулів SOLIDWORKS Simulation і SOLIDWORKS Flow Simulation. Поля розподілу швидкостей і абсолютних тисків вихрових потоків теплоносія в зоні А та С досліджувалися з використанням модуля симуляції Flow Simulation.

При різних комбінаціях об'ємних витрат теплоносія на вході в сушильну камеру крізь патрубки 1 і 5 визначено епюри швидкостей і тисків та напрямки вихрових потоків теплоносія.

Розрахунок № 1. Результати розрахунку вихрових потоків теплоносія зображені на рисунку 2.2 при встановлених об'ємних витратах:

через патрубок 1 –  $0,011 \text{ м}^3 / \text{с}$ ;

через патрубок 5 –  $0,0222 \text{ м}^3 / \text{с}$ .

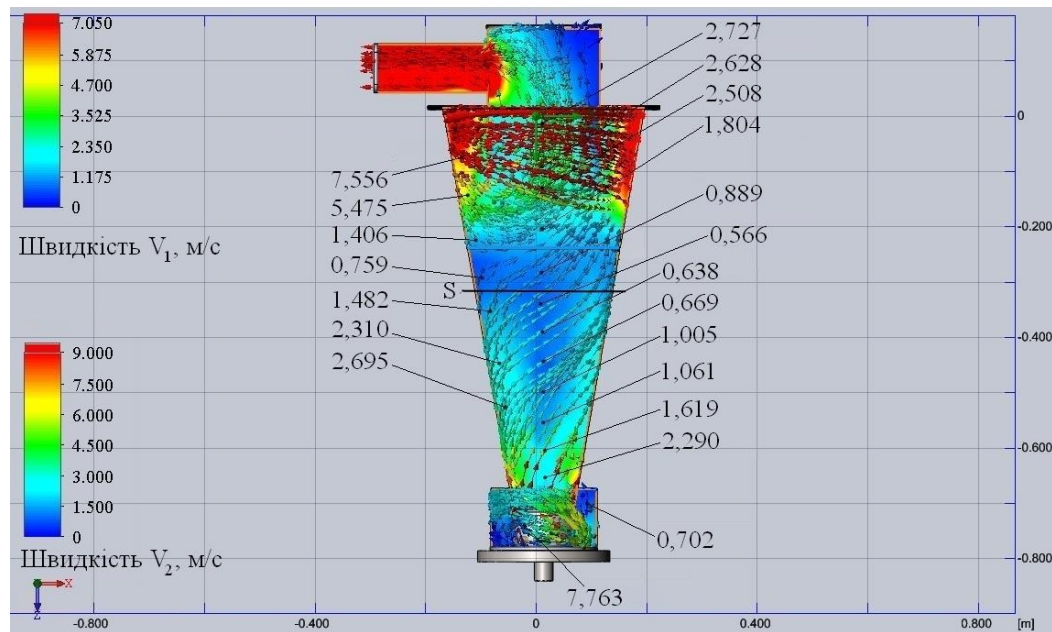
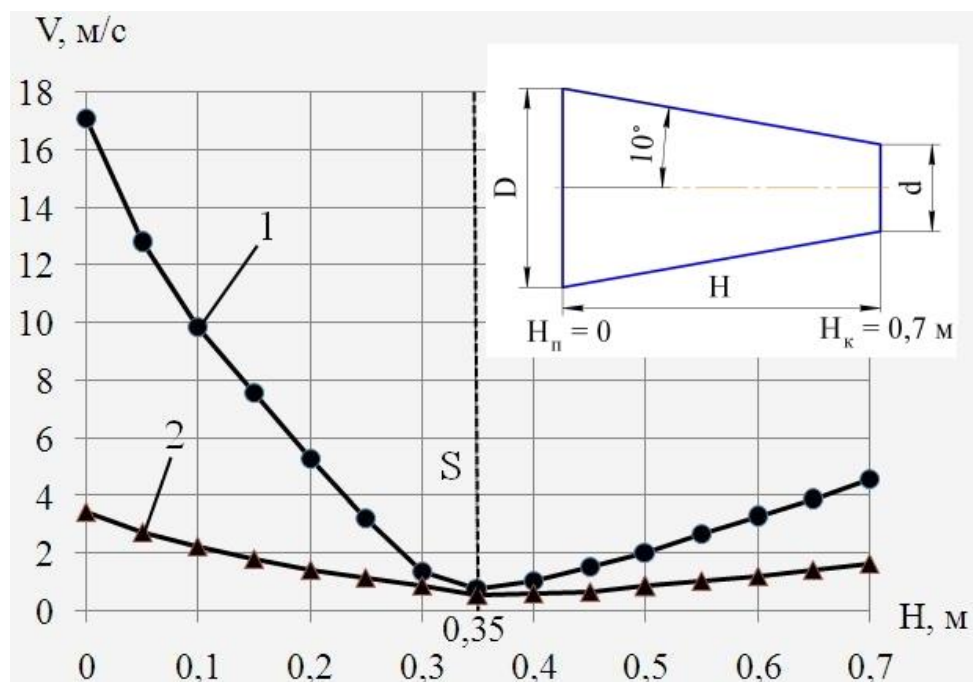


Рисунок 2.2 – Результати розрахунку: напрям і епюри швидкостей вихрових потоків теплоносія

Відповідно швидкість теплоносія в патрубку 1 становить  $V_1 = 2,9$  м/с, а в патрубку 5 –  $V_2 = 17,08$  м/с. Графічні залежності зміни тангенційної і осьової швидкостей потоку теплоносія і тиску по висоті конусоподібної сушильної камери зображені на рисунках 2.3 і 2.4. Основа конусу сушильної камери  $H_n = 0$  взята за точку відліку висоти.



1 – тангенційна швидкість; 2 – осьова швидкість

Рисунок 2.3 – Зміна швидкостей потоків теплоносія по висоті камери

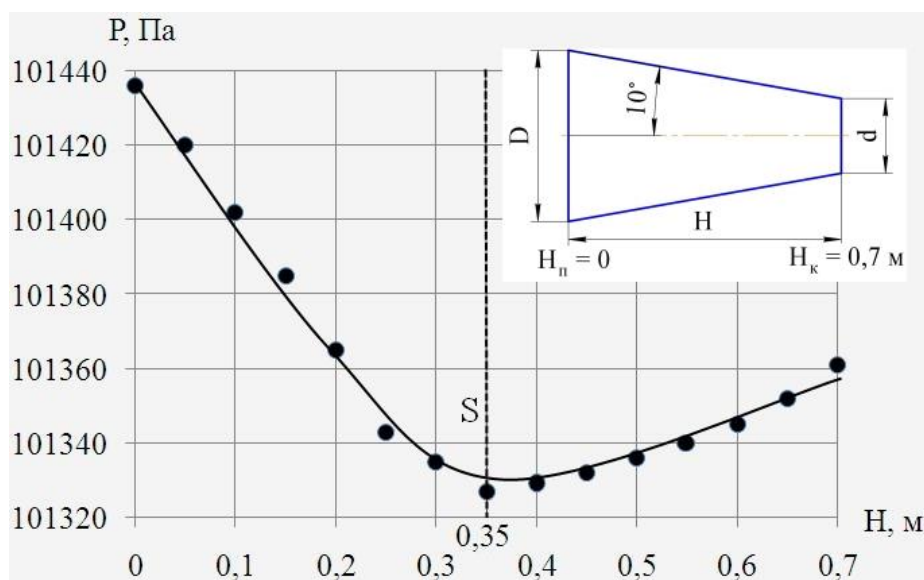


Рисунок 2.4 – Зміна тиску теплоносія біля стінок по висоті камери

Як видно із рисунку 2.3 максимальні значення тангенціальної швидкості 17,08 м/с і осьової – 3,42 м/с знаходяться у верхній частині сушильної камери, де тангенційно подається потік теплоносія в зону С. Потім величини швидкостей зменшуються до мінімальних значень, 0,76 м/с для тангенційної і 0,57 м/с для осьової, в області площини S (рис. 2.3). Напрямок потоків теплоносія (рис. 2.2) показує, що площина S розміщується в зоні зустрічі висхідного (нижнього) і низхідного (верхнього) вихрових потоків теплоносія і знаходиться на висоті камери приблизно  $H = 0,35$  м (рис. 2.3). В нижній частині камери швидкості збільшуються і сягають значень 4,56 м/с для тангенційної і 2,29 м/с для осьової швидкостей в зоні диспергування А. Збільшення швидкостей в зоні А пояснюється наявністю диспергатора, який ножами закручує вихровий потік теплоносія із  $n = 2850 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ . Тиск теплоносія біля стінок по висоті камери змінюється аналогічно зміні тангенційної швидкості верхнього і нижнього вихрових потоків (рис. 2.4).

Основною рушійною силою для процесу сепарації частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$  є крутка нижнього і, особливо, верхнього вихрового потоку теплоносія. Коефіцієнт крутки  $f$  є відношення тангенційної швидкості до осьової:

$$f_i = \frac{v_{\text{tan}i}}{v_{\text{axial}i}}, \quad (2.1)$$

де  $V_{tan_i}$  – тангенційна швидкість потоку теплоносія, що отримана із епюри (рис. 2.2) у відповідному поперечному перетині сушильної камери, м/с;  $V_{axial_i}$  – осьова швидкість потоку теплоносія, що отримана із епюри (рис. 2.2) у відповідному поперечному перетині сушильної камери, м/с.

На рисунку 2.5 зображено графічну залежність зміни величини крутки по висоті сушильної камери при заданих об'ємних витратах теплоносія.

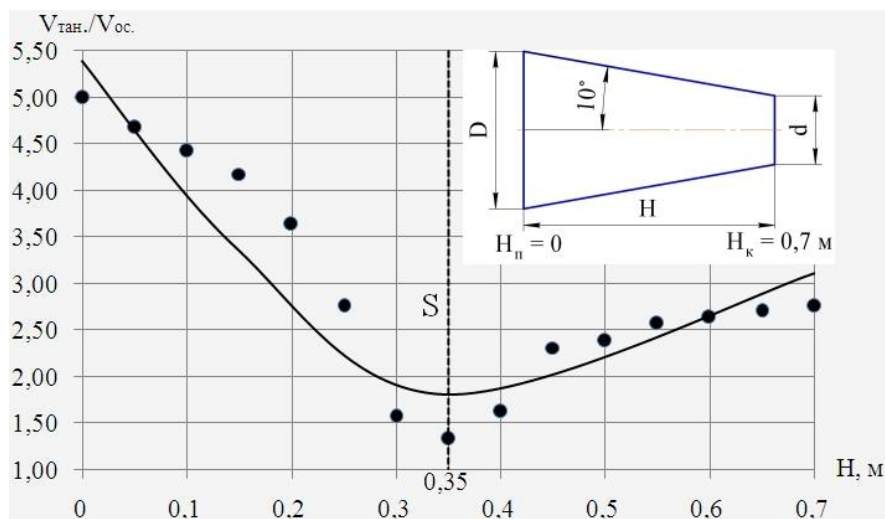
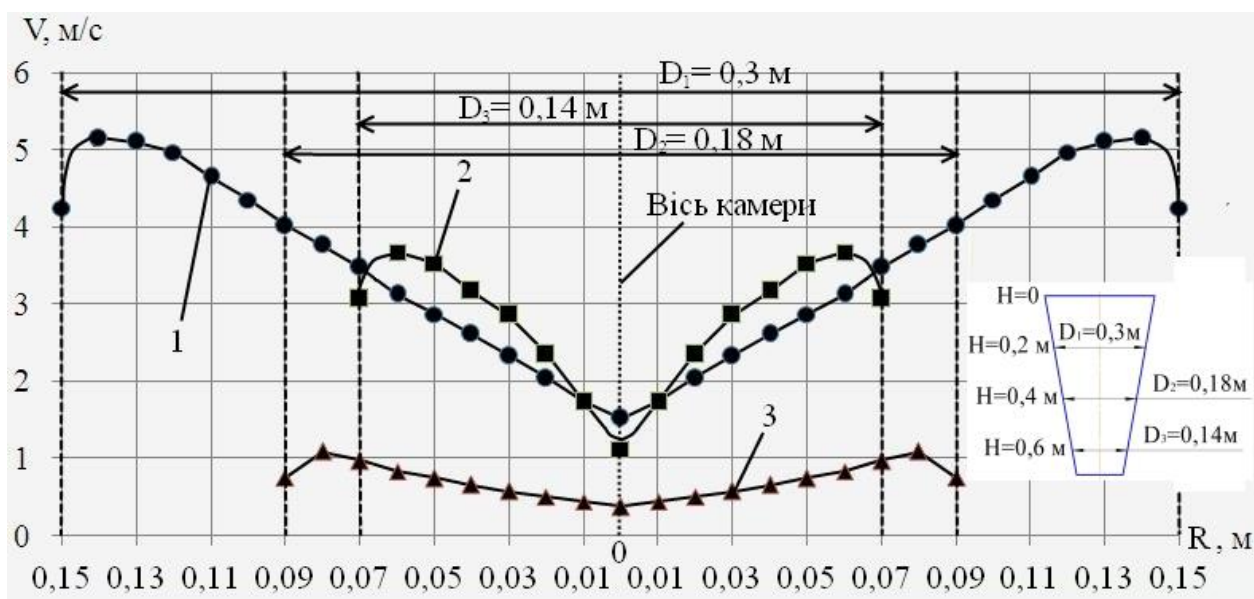


Рисунок 2.5 – Розподіл величини крутки по висоті камери

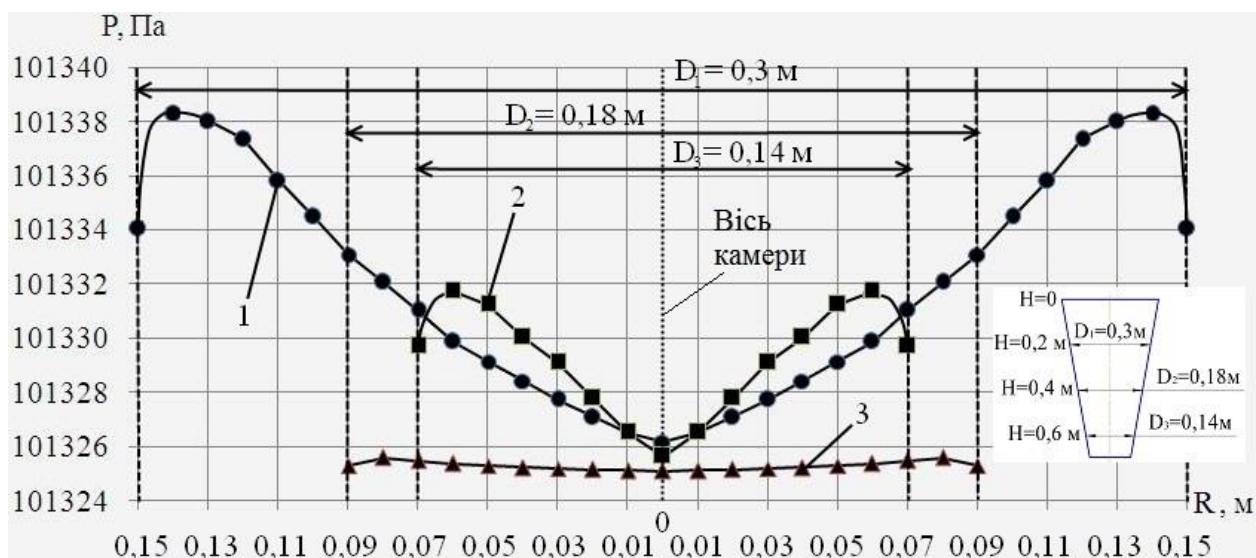
Зміни тангенційної швидкості і абсолютного тиску від діаметру сушильної камери зображені на рисунках 2.6 і 2.7.



1,2,3 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно

Рисунок 2.6 – Розподіл тангенційної швидкості по діаметру сушильної камери в різних її перетинах по висоті





1,2,3 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно  
Рисунок 2.7 – Розподіл абсолютного тиску по діаметру сушильної камери в різних її перетинах по висоті

Аналіз рисунків 2.6 та 2.7 показує, що величини швидкості і тиску змінюються від найменших в центрі камери до найбільших біля стінки. Перепад тиску по висоті сушильної камери в пристінній області спричиняє потік теплоносія, що транспортує відділені агломерати в зону подрібнення і сушіння.

Розрахунок № 2. Результати розрахунку вихрових потоків теплоносія зображені на рисунку 2.8 при встановлених об'ємних витратах:

через патрубок 1 –  $0,011 \text{ м}^3/\text{с}$ ; через патрубок 5 –  $0,0277 \text{ м}^3/\text{с}$ .

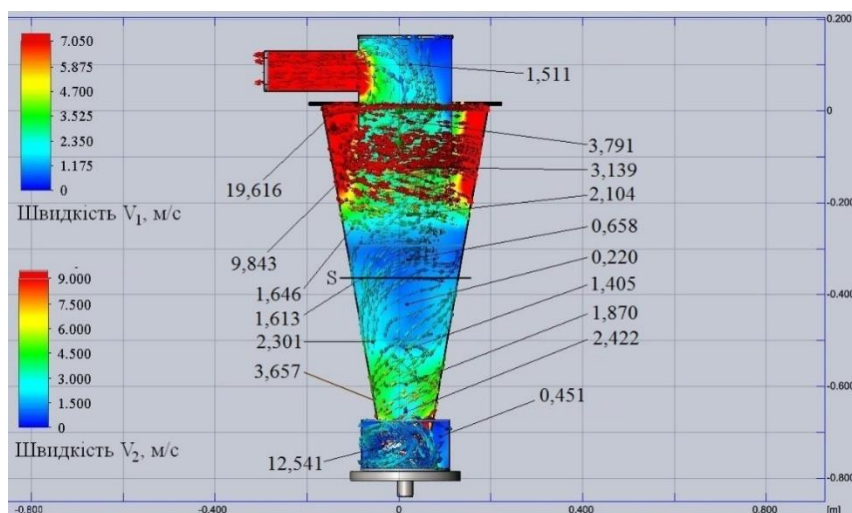
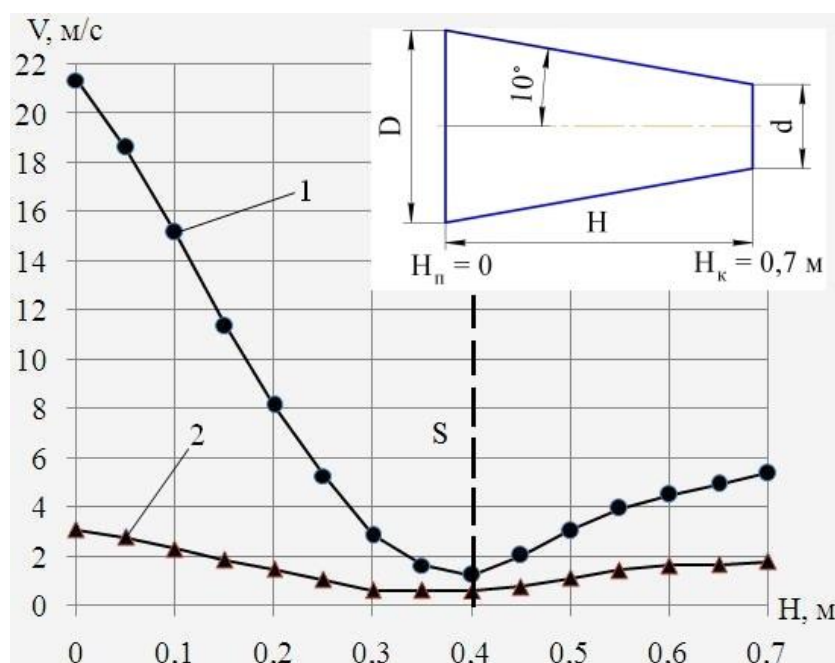


Рисунок 2.8 – Результати розрахунку: напрям і епюри швидкостей вихрових потоків теплоносія



Для даного розрахунку швидкість руху теплоносія в патрубку 1 становить  $V_1 = 2,9$  м/с, а в патрубку 5 –  $V_2 = 21,3$  м/с. Графічні залежності зміни тангенційної і осьової швидкостей потоку теплоносія і тиску по висоті сушильної камери зображені на рисунках 2.9 та 2.10.



1 – тангенційна швидкість;

2 – осьова швидкість

Рисунок 2.9 – Зміна швидкостей потоків теплоносія по висоті камери

Аналіз рисунку 2.9 показує, що мінімальні значення тангенційної і осьової швидкостей

знаходяться на висоті 0,4 м, де розміщується площина S зустрічі верхнього і нижнього вихрових потоків теплоносія.

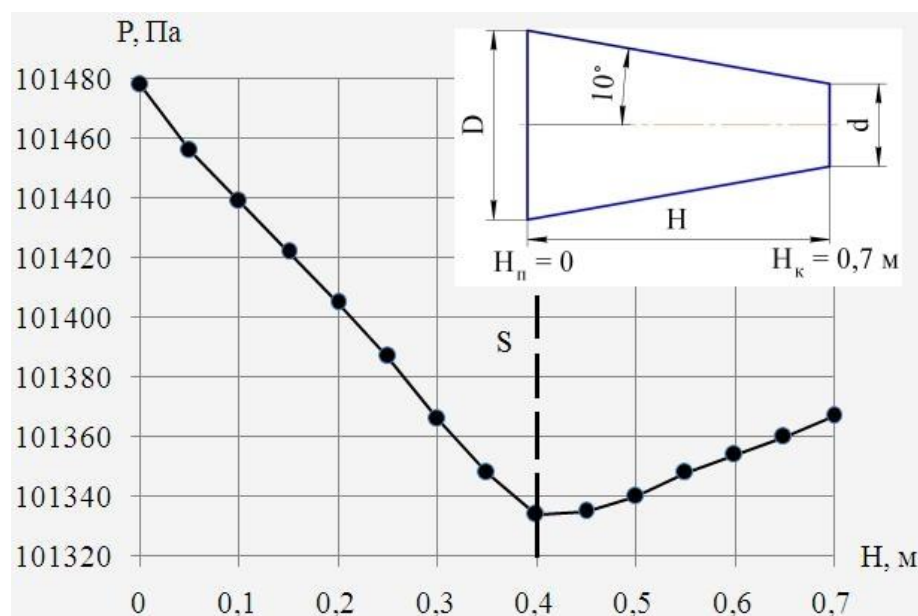


Рисунок 2.10 – Зміна тиску теплоносія біля стінок по висоті камери

Із рис. 2.10 видно, що мінімальне значення тиску становить 101334 Па і співпадає по висоті камери із площиною S. На рисунку 2.11 зображено

графічну залежність зміни величини крутки по висоті камери при заданих об'ємних витратах теплоносія.

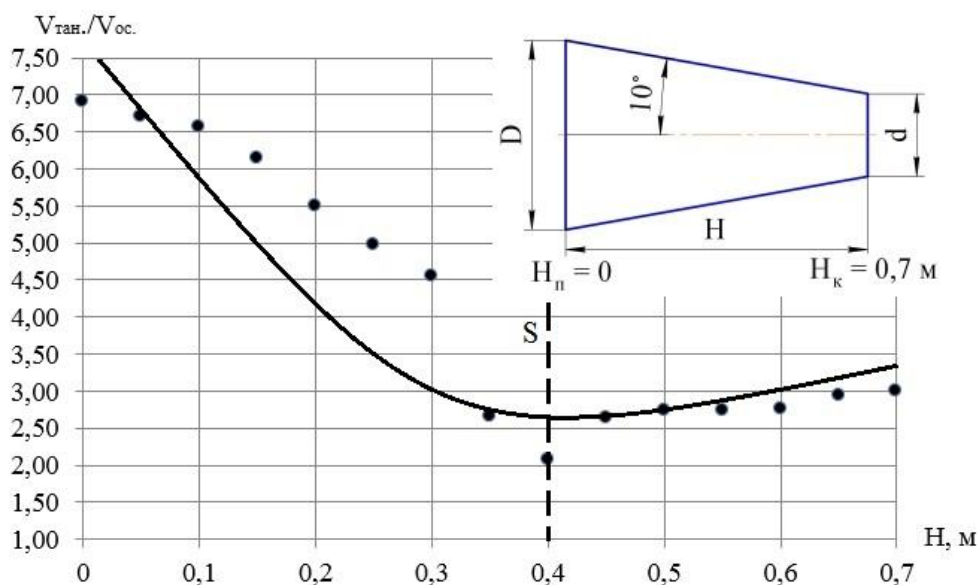
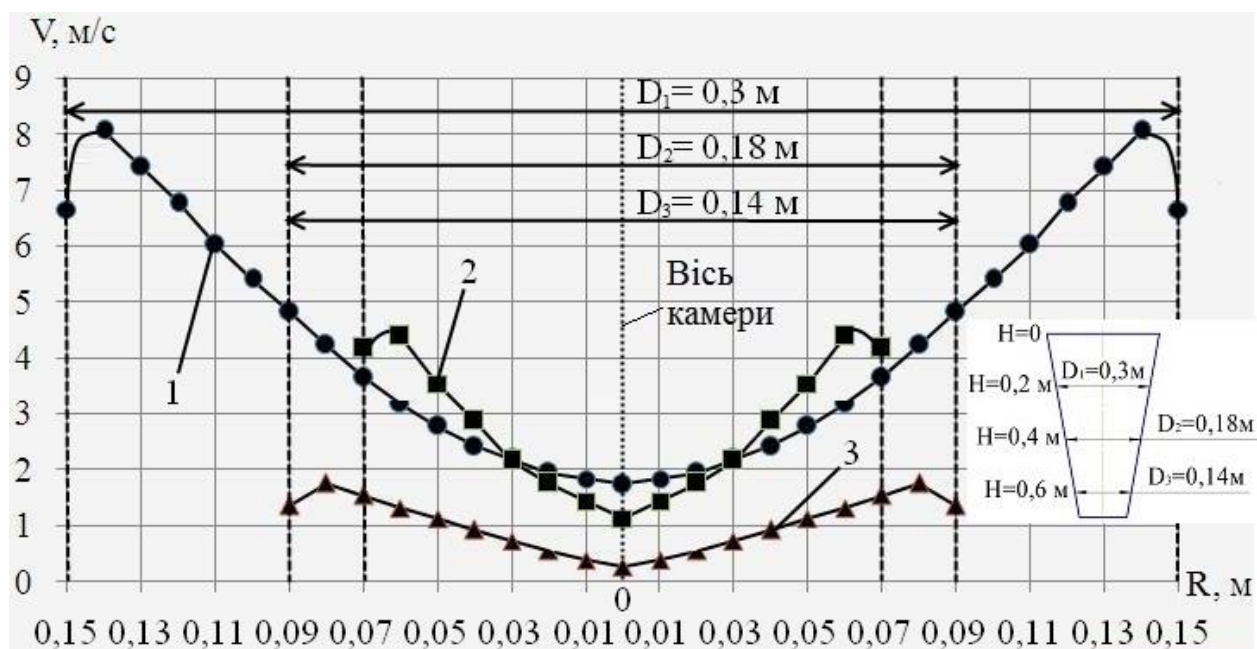


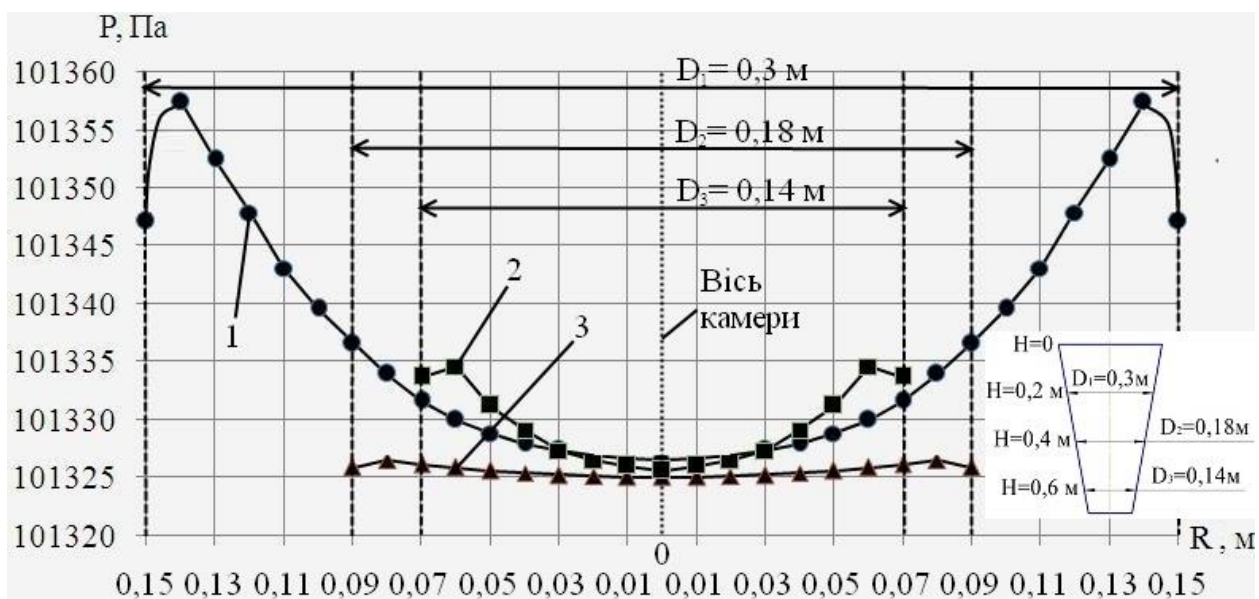
Рисунок 2.11 – Зміна величини крутки по висоті камери

Зміни тангенційної швидкості і абсолютного тиску по діаметру сушильної камери зображені на рисунках 2.12 і 2.13. Тангенційна швидкість має найбільші значення на периферії поперечного перетину сушильної камери, а найменші – в центрі камери.



1,3,2 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно

Рисунок 2.12 – Розподіл тангенційної швидкості по діаметру сушильної камери в різних її перетинах по висоті



1,3,2 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно  
Рисунок 2.13 – Розподіл абсолютного тиску по діаметру сушильної камери в різних її перетинах по висоті

Аналіз рисунків 2.12 та 2.13 показує, що величини швидкості і тиску приймають найменше значення в центрі камери, що свідчить про встановлення вихрового потоку теплоносія.

Розрахунок № 3. Результати розрахунку вихрових потоків теплоносія зображені на рисунку 2.14 при встановлених об'ємних витратах:

через патрубок 1 –  $0,011 \text{ м}^3/\text{с}$ ; через патрубок 5 –  $0,0333 \text{ м}^3/\text{с}$ .

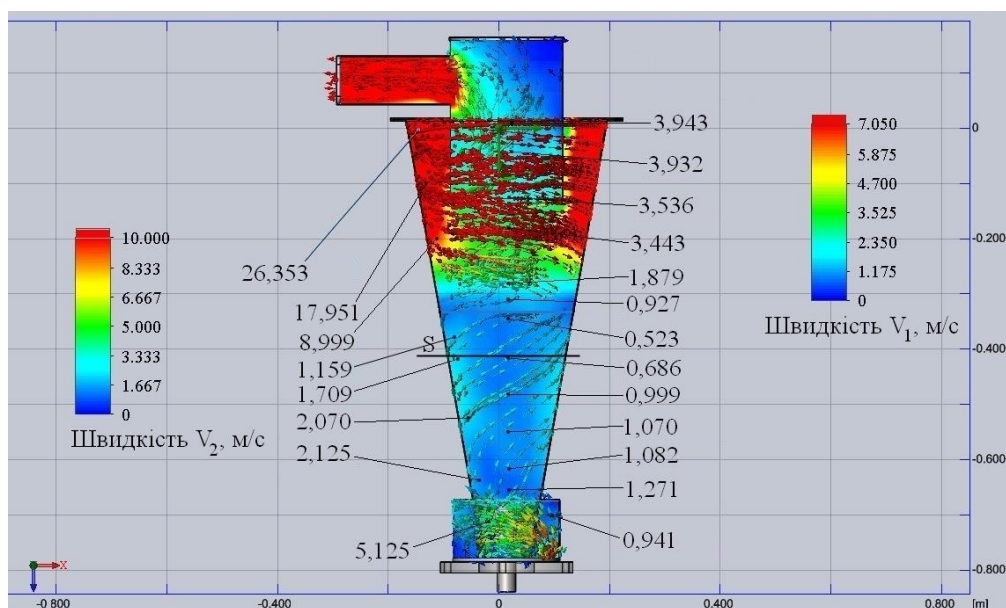
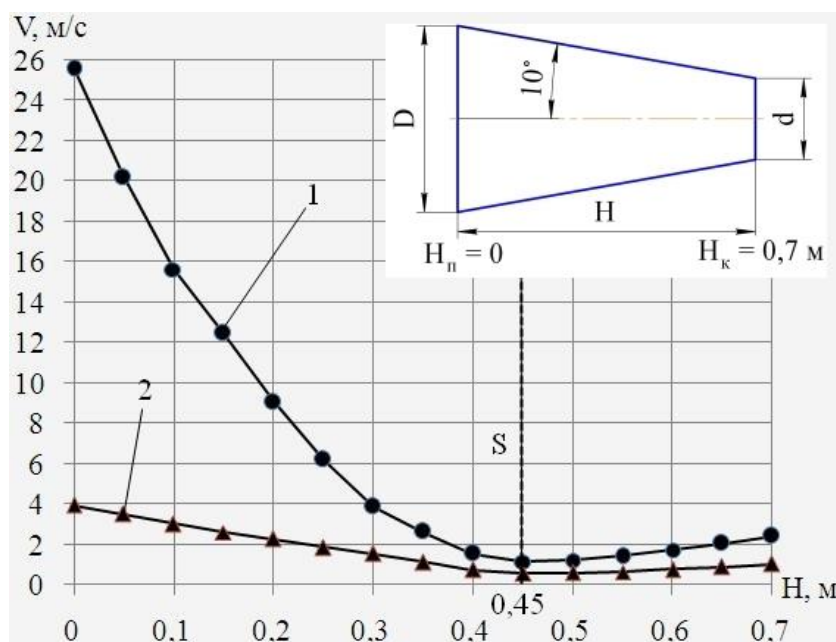


Рисунок 2.14 – Результати розрахунку: напрям і епюри швидкостей вихрових потоків теплоносія

Для даного розрахунку швидкість руху теплоносія в патрубку 1 становить  $V_1 = 2,9$  м/с, а в патрубку 5 –  $V_2 = 25,6$  м/с. Графічні залежності зміни тангенційної і осьової швидкостей потоку теплоносія і тиску від висоти сушильної камери зображені на рисунках 2.15, 2.16.



1 – тангенційна

швидкість;

2 – осьова швидкість

Рисунок 2.15 – Зміна швидкостей потоків теплоносія по висоті камери

Аналіз рисунку 2.15 показує, що мінімальні значення тангенційної і осьової

швидкостей знаходяться на висоті 0,45 м. Саме на цій висоті розміщується площина S.

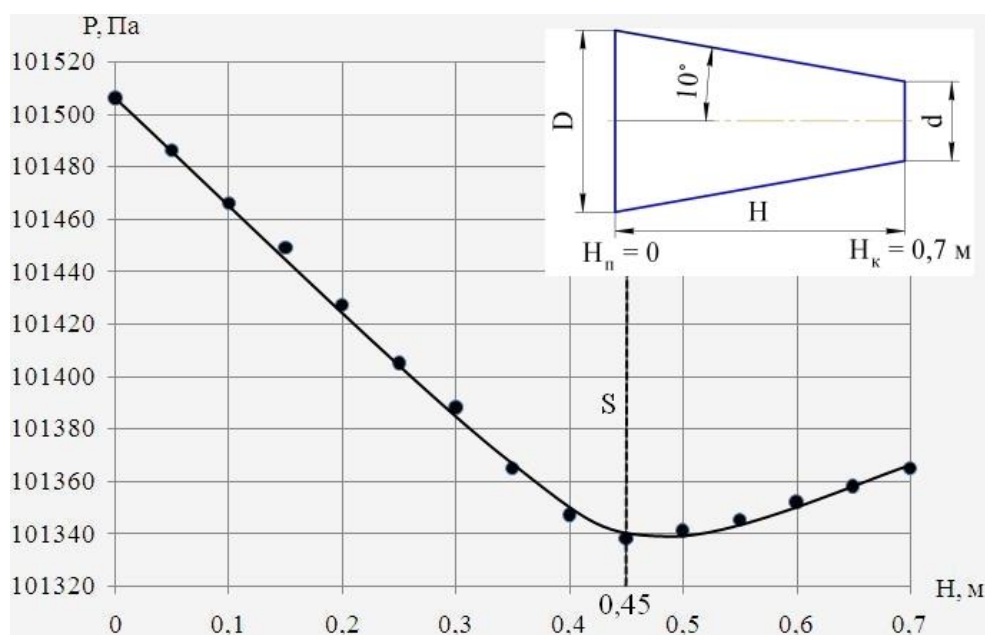


Рисунок 2.16 – Зміна тиску теплоносія біля стінки по висоті камери

Із рис. 2.16 видно, що мінімальне значення тиску становить 101338 Па і співпадає по висоті камери із площиною S. На рисунку 2.17 зображено



графічну залежність зміни величини крутки від висоти камери при заданих об'ємних витратах теплоносія.

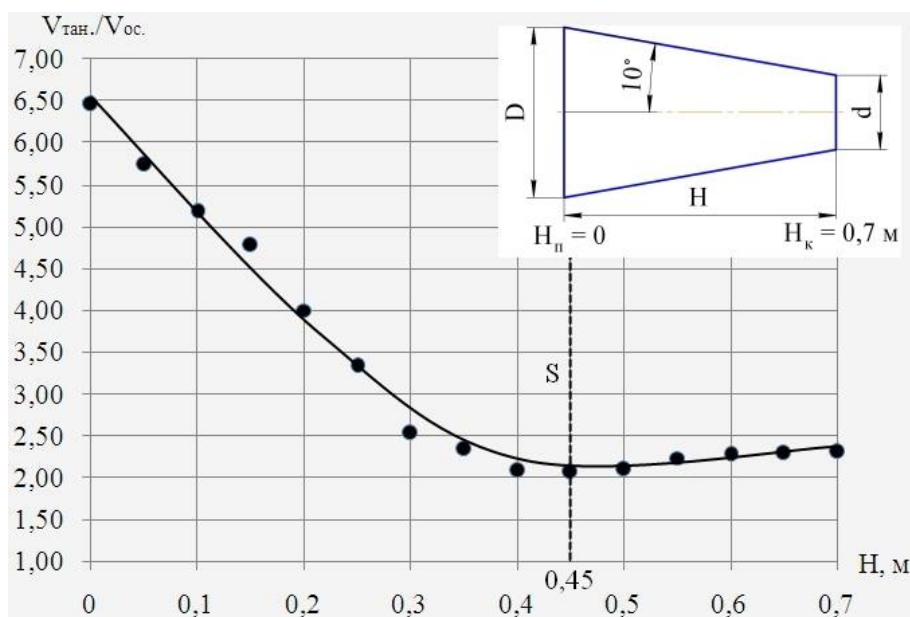
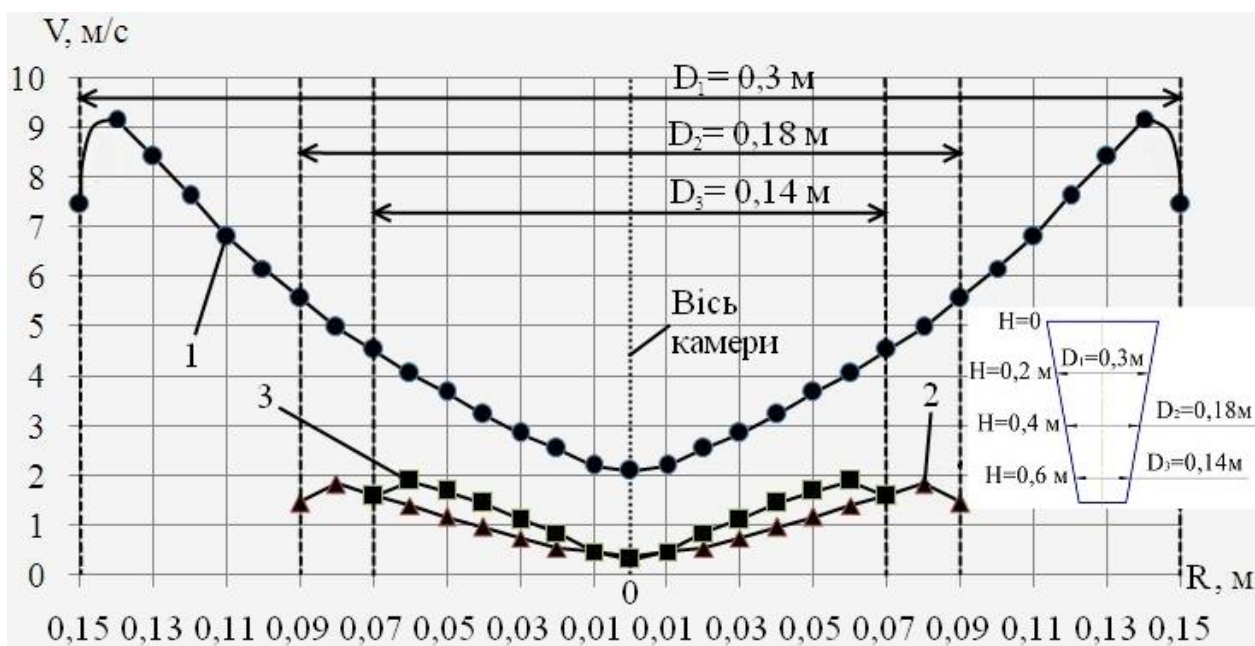


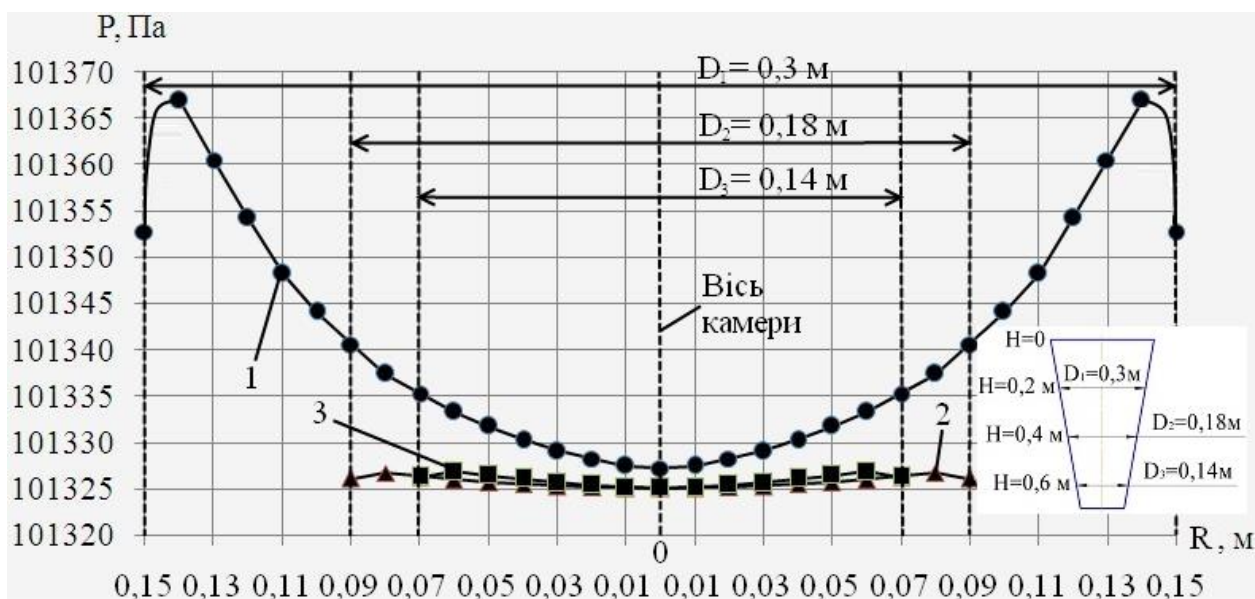
Рисунок 2.17 – Зміна величини крутки по висоті камери

Зміни тангенційної швидкості і абсолютного тиску від діаметру сушильної камери при заданих витратах зображені на рисунках 2.18 і 2.19.



1,3,2 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно

Рисунок 2.18 – Розподіл тангенційної швидкості по діаметру сушильної камери в різних її перетинах по висоті



1,3,2 – поперечні перетини камери на висотах 0,2 м, 0,4 м і 0,6 м відповідно

Рисунок 2.19 – Залежність абсолютного тиску по діаметру сушильної камери в різних перетинах по висоті

Аналіз рисунків 2.18 та 2.19 показує що величини швидкості і тиску приймають найменше значення в центрі камери, що свідчить про встановлення вихрового потоку теплоносія.

Як видно із рисунків 2.2, 2.8, 2.14 положення площини  $S$  – зони зустрічі двох вихрових потоків, закручених в одну сторону залежить від швидкостей подачі теплоносія в нижню (патрубок 1) та верхню (патрубок 5) частини сушильної камери. Зона  $S$  наближається до тієї частини камери де теплоносії подається із меншою швидкістю. Саме в зоні  $S$  два потоки теплоносія зменшують тангенційну і осьову швидкості, що сприяє сепаруванню крупних частинок вологого матеріалу, що мають більшу критичну масу від дрібних, в яких маса набагато менша.

В результаті два зустрічні теплоносії з'єднуються в сушильній камері і утворюють загальний закручений вихровий потік теплоносія і частинок матеріалу. Із рисунку 2.20 видно, що в результаті закручення двох потоків в одну сторону, вони не руйнують один одного, а зустрічаючись в середній зоні камери у площині  $S$ , об'єднуються і виводяться із сушильної камери.

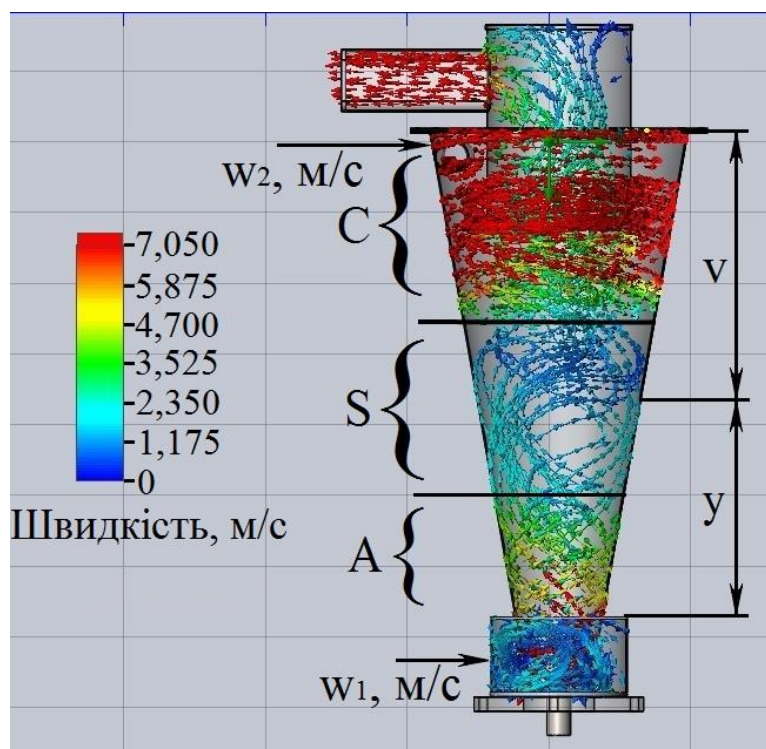


Рисунок 2.20 – Утворення загального вихрового потоку теплоносія

Залежність положення площини (зони) S від співвідношення величин швидкостей теплоносія  $W_2/W_1$  в патрубку 5 і патрубку 1 відповідно зображено на рисунку 2.21.

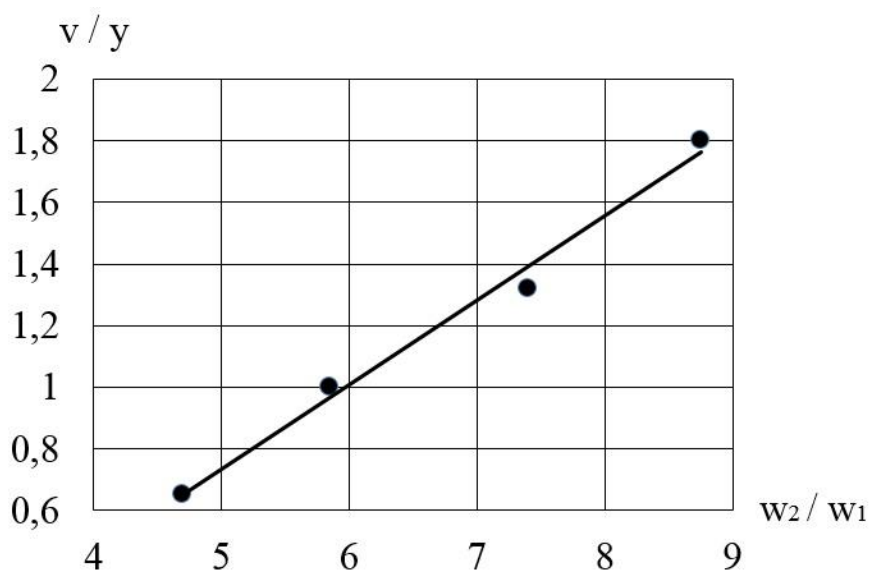


Рисунок 2.21 – Залежність положення площини (зони) S від співвідношення величин швидкостей теплоносія в на входах в сушильну камеру

Висновки: встановлено аеродинамічні характеристики оригінальної сушильної камери, такі як тиск та швидкість вихрових потоків теплоносія за допомогою можливостей автоматизованої системи проектування та

модельовання *SolidWorks Simulation 2017*. Результати дослідження аеродинаміки засвідчують, що:

- внаслідок тангенційного введення теплоносія на досушування у верхній частині сушильної камери утворюється стійкий вихровий шар;
- тиск теплоносія в центрі сушильної камери менший, ніж на периферії, значення та перепад якого можна визначити із епюр;
- в оригінальній сушильній камері вихровий потік теплоносія розділяється на дві складові швидкості: осьову і тангенційну, поля значень яких можна визначити із епюр;
- швидкість сушильного агенту в зонах С і D менша, ніж в зонах А і В, що уможливорює здійснення сепарування тонкодисперсних підсушених частинок матеріалу від вологих агрегатів;
- коефіцієнт закручування потоків складає 5,82...8,8 для даної конфігурації сушильної камери.

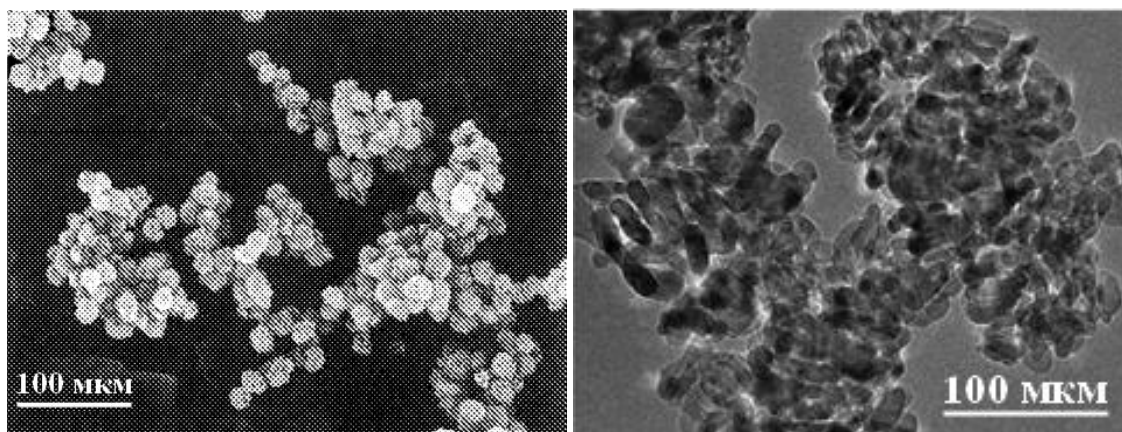
## **2.2 Фізична модель процесу сушіння тонкодисперсної пасти та досушування порошку діоксиду титану**

В даній роботі сушіння тонкодисперсної пасти відбувається у вихровому потоці теплоносія, що має дуже багато суттєвих переваг у порівнянні із кондуктивним, розпилюючим способами сушінням та сушінням в киплячому шарі на інертних тілах.

Об'єктом сушіння є пастоподібний капілярно пористий матеріал, що містить кристали діоксиду титану, з'єднані в пастоподібну масу силами поверхневого натягу води. Тонкодисперсний порошок діоксиду титану, що має кристалічну рутильну або анатазну форми, представлено на рисунку 2.22а, а пастоподібну форму матеріалу  $\text{TiO}_2$  зображено на рисунку 2.22б [43]. Розміри кристалів залежать від технологічних режимів кристалізації продукту. За ГОСТ 9808-84 [44] тонкодисперсні частинки повинні мати розміри не більше 12 – 15 мкм. Частинки  $\text{TiO}_2$  у суміші з водою утворюють



тиксотропну пасту. За механічного впливу на пасту зменшується її в'язкість та збільшується текучість.



а)

б)

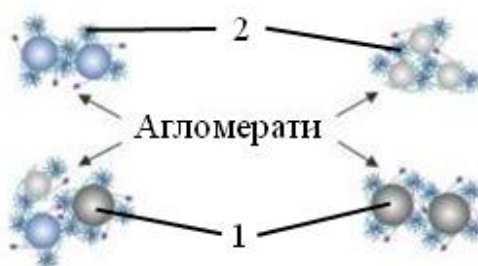
а) – фотографія кристалів  $\text{TiO}_2$ , збільшення в 200000 разів;

б) – фото пасту діоксиду титану, збільшення в 200000 разів

Рисунок 2.22 – Тонкодисперсні частинки діоксиду титану

Із рисунку 2.22б видно, що кристали розміщуються хаотично, отже між ними утворюються тонкі канали, просвіти, порожнини, які й заповнюються водою, утворюючи гетерогенну структуру – тиксотропну пасту.

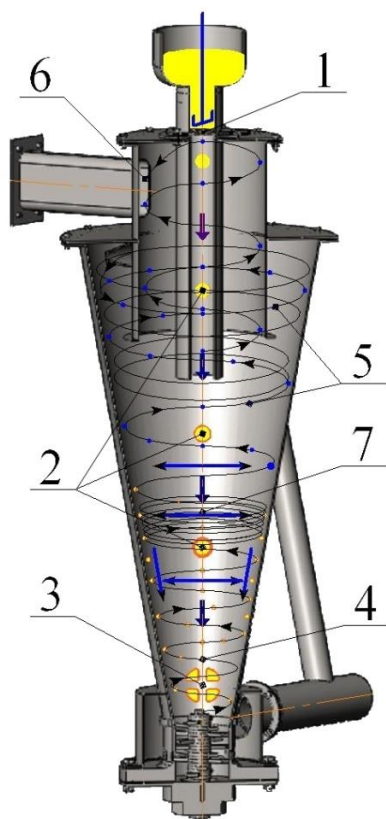
Вода в пасті  $\text{TiO}_2$  існує в таких видах (рисунок 2.23): поверхнева, капілярна, мікрокапілярна та адсорбційно-зв'язана.



1 – тонкодисперсні частинки  $\text{TiO}_2$ ; 2 – капілярна волога

Рисунок 2.23 – Агломерати кристалів діоксиду титану

Основні технологічні етапи сушіння пасту діоксиду титану у вихровому апараті показано на рисунку 2.24.



- 1 – формування частинок пасти  $\text{TiO}_2$ ;
- 2 – подача частинок матеріалу в зону сушіння та подрібнення;
- 3 – сушіння і одночасне подрібнення у псевдозрідженому вихровому шарі частинок  $\text{TiO}_2$ ;
- 4 – винесення потоком теплоносія тонкодисперсних частинок і агломератів в зону вихрового шару та їх сепарація;
- 5 – досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану;
- 6 – транспортування висушеного продукту в рукавний фільтр;
- 7 – зона зустрічі висхідного нижнього і низхідного

верхнього вихрових потоків теплоносія

Рисунок 2.24 – Схема конструкції дослідного сушильного апарату з вказаними зонами здійснення технологічних процесів

В якості теплоносія використовується повітря, нагріте до температури  $t_1$ . Із тиксотропної пасти діоксиду титану формуються через філь'єру протираючого живильника окремі частинки циліндричної форми із еквівалентним початковим діаметром  $d_{\text{екв.0}} \approx 4$  мм. Сформовані частинки пасти, відірвавшись від філь'єри під дією сили тяжіння, падають через шар пило-газової суміші теплоносія у вихровий псевдозріджений шар. За час падіння і контакту з вихровим шаром поверхня сформованих частинок пасти матеріалу діоксиду титану втрачає властивості адгезії і тиксотропності (рисунок 2.25).

У вихровому псевдозрідженому шарі, створеному потоком теплоносія і ножами ротора, в результаті контакту вологої поверхні частинок пасти з теплоносієм відбувається інтенсивне випаровування води з поверхні і капілярів агломератів пасти.

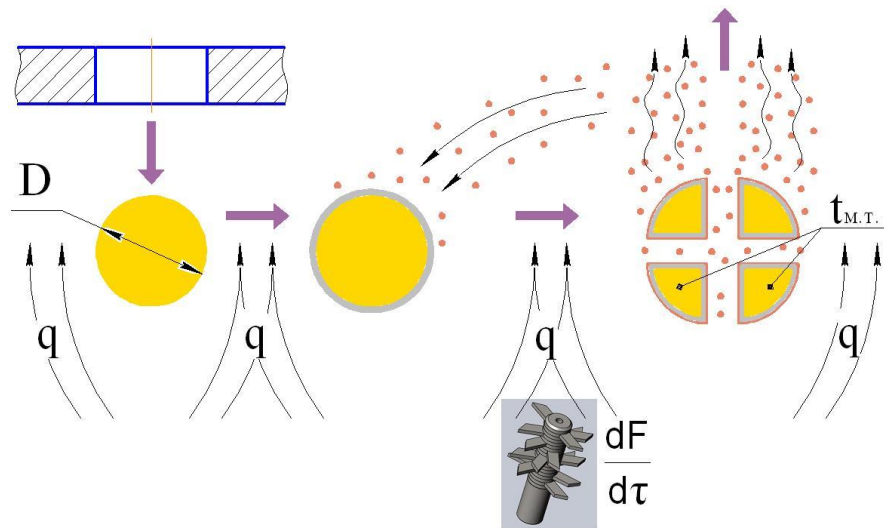


Рисунок 2.25 – Схема процесу подрібнення частинок пасти  $\text{TiO}_2$  з одночасним висушуванням поверхневої вологи матеріалу в першому періоді сушіння

В першому періоді сушіння процес випаровування відбувається з постійною швидкістю  $\frac{dW}{d\tau} = \text{const}$ , при постійній температурі випаровування вологи із поверхні частинок пасти, що дорівнює температурі мокрого термометра  $t_{m.t.} = \text{const}$ . Безперервне подрібнення частинок пасти ножами ротора збільшує вологу поверхню шару частинок матеріалу і зменшує їх розміри ( $d_1$ ), що подовжує більш інтенсивний перший період сушіння за рахунок зменшення тривалості другого, більш повільного, періоду сушіння. При цьому, випаровування вологи з поверхні частинок пасти діоксиду титану аналогічне випаровуванню з поверхні води. Внутрішній опір масопровідності матеріалу частинок пасти не впливає на інтенсивність процесу сушіння, швидкість якого повністю залежить від швидкості дифузії в зовнішній області. Тобто, коефіцієнт масопередачі в парогазовій фазі дорівнює коефіцієнту масовіддачі  $K = \beta$ , а рівняння масопередачі в парогазовій фазі заміняється рівнянням масовіддачі. При цьому, рівноважні параметри є відповідними параметрам насиченої пари біля поверхні частинок, що висушуються.

В процесі сушіння випаровується поверхнева вода, що з'єднує і утримує кристали  $\text{TiO}_2$  в межах частинок пасти. Висушені кристали та окремі

вологі агломерати відділяються від висушуваних частинок пасти і виносяться вихровим потоком теплоносія в зону сепарації. Ця зона утворюється в місці зустрічі верхнього низхідного закрученого потоку теплоносія із нижнім висхідним (рисунок 2.20). Під дією відцентрової сили  $\overrightarrow{F_{\text{відц.}}}$  недосушені агломерати і крупні частинки матеріалу із масою  $m_1$  переміщуються до стінки конічного корпусу сушильного апарату, де пристінним низхідним потоком теплоносія транспортуються назад у псевдозріджений вихровий шар для подальшого подрібнення і висушування (рисунок 2.26).

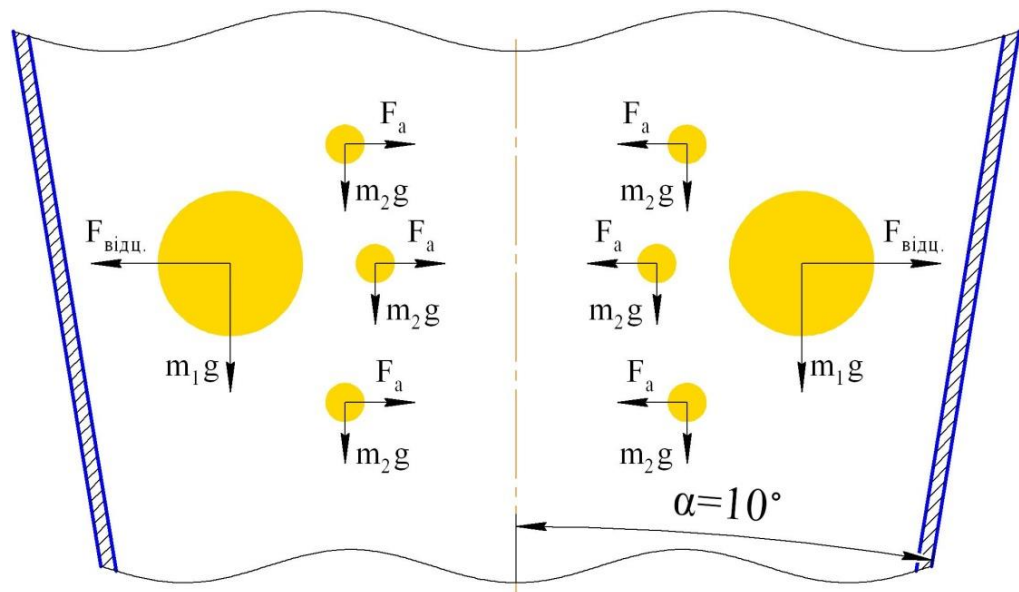


Рисунок 2.26 – Фізична модель сепарації підсушених частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$

Кристали і дрібні частинки розміром  $d_1 \leq 12 \dots 15$  мкм із масою  $m_2$  під дією аеродинамічних сил радіального потоку теплоносія виносяться у центральну частину вихрового потоку, де осьовий потік переміщує їх у зону досушування адсорбційно-зв'язаної вологи (рисунок 2.27). У зоні досушування осьовий потік теплоносія із тонкодисперсною фракцією кристалів і агломератів  $\text{TiO}_2$  змішується із закрученим потоком свіжого теплоносія, який поступає через верхній тангенціальний ввід апарату із температурою  $t_1$  і відносною вологістю  $\varphi_1$  та густиною  $\rho_2 < \rho_1$ , меншою в результаті більшої температури.

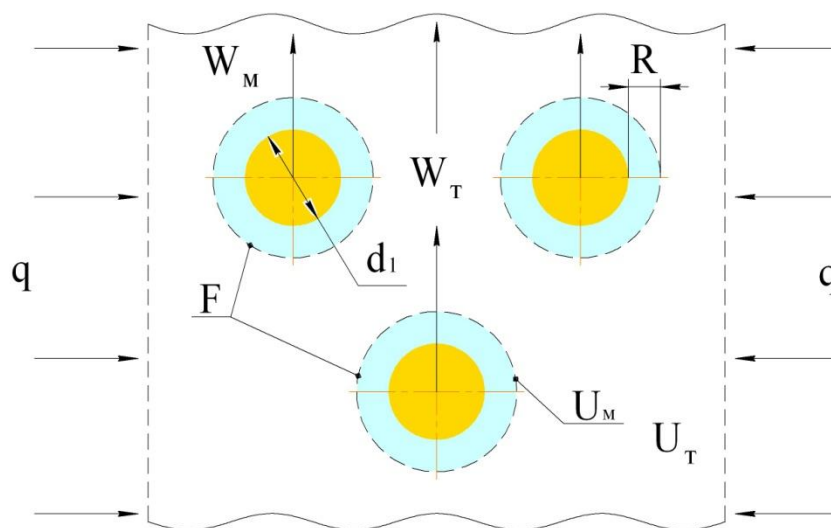


Рисунок 2.27 – Схема процесу досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  в 2 періоді

У результаті змішування нижнього і верхнього потоків теплоносія температура в зоні досушування збільшується і, відповідно, збільшується температура дисперсних частинок діоксиду титану, що розподілені в теплоносії. Малі розміри тонкодисперсних частинок і, відповідно, велика парусність забезпечують їх швидкість, однакову зі швидкістю теплоносія. Температура частинок зростає, а температура теплоносія зменшується в результаті висушування адсорбційної вологи з поверхні частинок і їх нагрівання.

Висушений до заданої вологості тонкодисперсний порошок діоксиду титану переноситься потоком теплоносія в рукавний фільтр, де відділяється від теплоносія і направляється на наступні технологічні операції.

### 2.3 Математична модель процесу сушіння пасти $\text{TiO}_2$ в псевдозрідженому вихровому шарі

Математична модель сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану описує два процеси: процес сушіння поверхневої води при безперервному оновленні вологої поверхні шляхом подрібнення; процес досушування тонкодисперсного порошкового матеріалу в потоці теплоносія.

Перший процес сушіння здійснюється в псевдозрідженому вихровому шарі частинок пасти, що безперервно подрібнюються ножами диспергатора (рисунок 2.24, зона 3 сушильної камери). В результаті подрібнення збільшується волога поверхня частинок і зменшуються їх еквівалентні діаметри  $d_{\text{екв.}}$ , що збільшує інтенсивність процесу випаровування. Процес сушіння практично весь час здійснюється в першому періоді з постійною швидкістю  $\frac{dW}{d\tau} = \text{const}$  і постійною температурою матеріалу, що дорівнює температурі мокрого термометра  $t_{\text{м.т.}} = \text{const}$ . В даному процесі випаровується незв'язана вода з поверхні твердого тіла частинок пасти.

В результаті безперервного подрібнення агломератів пасти діоксиду титану постійно оновлюється їх волога поверхня, з якої відбувається дифузія вологи в об'єм теплоносія. Внаслідок цього внутрішній опір матеріалу не лімітує процес сушіння і залишається лише зовнішня задача, що лімітується швидкістю дифузії вологи із поверхні частинок матеріалу в об'єм теплоносія. У цьому випадку процес сушіння представляє собою вільне випаровування вологи із поверхні матеріалу, а тепломасообмін може бути описаний наступною системою рівнянь [37]:

$$\begin{cases} m_{\text{м}} \frac{dU}{d\tau} = -\beta(t_{\text{т}}) \cdot S \cdot (p_{\text{с}} - p) \\ m_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}}(t_{\text{м}}) \cdot \frac{dt}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (t_{\text{т}} - t_{\text{м}}) - m_{\text{м}} \frac{dU}{d\tau} \cdot r(t_{\text{м}}) \end{cases} \quad (2.2)$$

де  $m_{\text{м}}$  – маса матеріалу, кг;  $dU$  – вологовміст матеріалу,  $\text{кг}_{\text{в}}/\text{кг}_{\text{а.с.м.}}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $S$  – поверхня розділу фаз,  $\text{м}^2$ ;  $p_{\text{с}}$  – тиск насиченої пари в теплоносії, Па;  $p$  – парціальний тиск пари в теплоносії, Па;  $c_{\text{м}}$  – питома теплоємність теплоносія,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;  $r$  – питома температура пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $t_{\text{т}}$  – температура теплоносія, К;  $t_{\text{м}}$  – температура матеріалу, К.

Детально розглянемо теорію процесу сушіння пасти діоксиду титану і розпишемо складові рівнянь 2.2.

Частинки матеріалу, що висушуються, мають форму, яка близька до сферичної. В цьому випадку при тепломасообмінних розрахунках розмір



частинок неправильної форми умовно замінюють діаметром сфери, що еквівалентна частинці за її об'ємом  $V_{\text{ч}}$ , м<sup>3</sup>. Еквівалентний діаметр частинки виражається через її об'єм  $V_{\text{ч}}$ , м<sup>3</sup> [24]:

$$d_{\text{екв.}} = \sqrt{\frac{6 \cdot V_{\text{ч}}}{\pi}} \quad (2.3)$$

Неправильність форми частинки матеріалу визначається через фактор форми, що характеризує відхилення реальної форми частинки від сферичної. Фактор форми виражається коефіцієнтом сферичності  $\psi$ , який є відношенням поверхні сфери  $S_{\text{сф}}$ , що є еквівалентна за об'ємом частинки до поверхні частинки  $S_{\text{ч}}$  ( $\psi \leq 1$ ):

$$\psi = \frac{S_{\text{сф}}}{S_{\text{ч}}} \quad (2.4)$$

Оскільки матеріал подається через фільтр живильника у вигляді коротких циліндрів із визначальним розміром  $l$ , що дорівнює діаметру  $d = 0,003$  м, і висотою  $h = 1,5 \cdot d$  (рисунок 2.28), то для частинок пасти діоксиду титану  $\psi$  становить 0,83 [24].

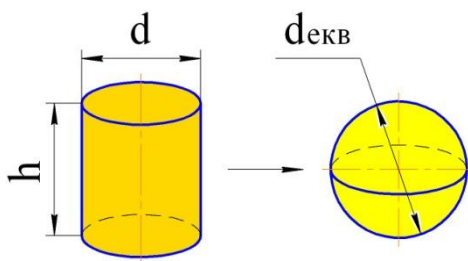


Рисунок 2.28 – Початкова форма частинок пасти  $\text{TiO}_2$

Коефіцієнт форми  $\Phi$  для частинок діоксиду титану визначається за відношенням [24]:

$$\Phi = \frac{2d}{h} + 4 \quad (2.5)$$

Враховуючи 2.1 і 2.2 початковий еквівалентний діаметр частинок матеріалу визначається як [24]:

$$d_{\text{екв.0}} = \frac{6l}{\Phi\psi}, \quad (2.6)$$

де  $l = 0,003$  м – визначальний початковий розмір частинок пасти  $\text{TiO}_2$ .

При зміні стану частинки  $\text{TiO}_2$  від пасти до агломерату її розмір змінюється в залежності від густини і вологовмісту матеріалу [24]:

$$d_{\text{екв.}} = d_{\text{екв.0}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{м0}}(1+U)}{\rho_{\text{м}}(1+U_0)}}, \quad (2.7)$$

де  $\rho_{m0}, U_0$  – початкова густина і вологовміст пасти діоксиду титану;  
 $\rho_m, U$  – поточні густина і вологовміст матеріалу діоксиду титану.

Початкові і поточні густини і питомі теплоємності матеріалу діоксиду титану розраховується за принципом адитивності, використовуючи теплофізичні величини твердої і рідкої фаз [28]:

$$\rho_m = \rho_{TiO_2}(t) \cdot (1 - w) + \rho_{H_2O}(t) \cdot w, c_m = c_{TiO_2}(t) \cdot (1 - w) + c_{H_2O}(t) \cdot w, \quad (2.8)$$

де  $w$  – вологість матеріалу діоксиду титану,  $\frac{кг}{кг}$ ;  $\rho_{TiO_2}, \rho_{H_2O}$  – відповідно густина абсолютно сухого порошку діоксиду титану і води в залежності від температури матеріалу.

Густина і в'язкість теплоносія залежать від його температури  $t_T$ :

$$\rho_T = \frac{\rho_0 \cdot 273}{273 + t_T}, \quad (2.9)$$

$$\vartheta_T = \vartheta_0 \cdot \frac{273}{273 + t_T}, \quad (2.10)$$

де  $\rho_0 = 1,29 \frac{кг}{м^3}$  і  $\vartheta_0 = 3,009 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$  – густина і в'язкість теплоносія за нормальних умов при температурі навколишнього середовища  $t = 0$  °C.

Критерій Рельнойдса, що відповідає критичній швидкості початку псевдозрідження  $Re_{кр}$  та умовам виносу частинок  $TiO_2$  –  $Re_B$  [25]:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (2.11)$$

$$Re_B = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (2.12)$$

де  $Ar$  – критерій Архімеда,  $Ar = g \cdot d_{екв.}^3 \cdot \frac{\rho_m - \rho_T}{\rho_T \cdot \vartheta_T^2}$ , де  $g = 9,807$  м/с – прискорення вільного падіння.

Відповідно критична швидкість теплоносія  $w_{кр}$  для початку псевдозрідження та швидкість виносу частинок  $w_B$  становлять:

$$w_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \vartheta_0}{d_{екв.}}, \quad w_B = \frac{Re_B \cdot \vartheta_0}{d_{екв.}} \quad (2.13)$$

Робоча швидкість вихрового потоку теплоносія і робочий критерій  $Re_p$  розраховується із врахуванням числа псевдозрідження  $K_w = 1,36$  [26]:



$$w_p = w_{кр} \cdot K_w, \quad Re_p = \frac{w_p \cdot d_{екв.}}{\vartheta_0} \quad (2.14)$$

Конвективну тепловіддачу у вихрових двофазних потоках теплоносія і матеріалу діоксиду титану описує критеріальне рівняння [37]:

$$Nu_1 = 2 + 0,16 \cdot Re_p^{0,667} \quad (2.15)$$

Коефіцієнт тепловіддачі становить:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_T}{d_{екв.}}, \quad (2.16)$$

де  $\lambda_T$  – середня теплопровідність теплоносія, що залежить від його температури  $t_T$ :  $\lambda_T = \lambda_0 \cdot \frac{273}{273+t_T}$ ,  $\lambda_0 = 0,0334 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  – теплопровідність повітря при  $t = 0^\circ \text{C}$ .

Вологовміст теплоносія на вході  $x_0$  і виході  $x_2$  із вихрового псевдозрідженого шару приймаємо із I-d діаграми стану вологого повітря при заданих параметрах процесу сушіння: початковій температурі  $t_{T_0}$  і відносній вологості  $\varphi_{T_0}$  теплоносія та температурі теплоносія  $t_{T_1}$  на вході у вихровий псевдозріджений шар матеріалу  $\text{TiO}_2$ . Середня температура частинок пасти дорівнює температурі мокрого термометра  $t_{\text{м.т.}}$ .

Проміжний вологовміст теплоносія:

$$x_1 = x_0 + \Delta x, \quad (2.17)$$

де  $\Delta x$  – зміна (приріст) поточного вологовмісту теплоносія, що залежить від часу і швидкості сушіння  $\frac{dW}{d\tau}$ .

Парціальний тиск водяної пари в теплоносії, що відповідає проміжному його вологовмісту, визначається [24]:

$$p_T = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{г}}} \cdot P_{\text{атм.}} \cdot x_1, \text{ або } p_T = P_s \cdot \varphi \quad (2.18)$$

де  $P_{\text{атм.}} = 100 \text{ кПа}$  – атмосферний тиск;  $P_s$  – тиск насиченої водяної пари, Па;  $R_{\text{г}} = \frac{R}{M_{\text{г}}}$ ,  $R_{\text{п}} = \frac{R}{M_{\text{п}}}$  – універсальні газові сталі для повітря і водяної пари відповідно;  $M_{\text{г}}$  і  $M_{\text{п}}$  – молярні маси повітря і водяної пари відповідно,  $\frac{\text{г}}{\text{моль}}$ ;  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – універсальна газова стала.

Розрахунковий тиск насиченої пари в теплоносії становить [24]:

$$P_s = \frac{2}{15} \cdot \exp\left(18,5916 - \frac{3991,11}{t_T + 233,84}\right) \quad (2.19)$$

Коефіцієнт дифузії водяної пари з вологої поверхні частинок  $\text{TiO}_2$  [24]:

$$D = D_0 \frac{P_0}{p_T} \cdot \left(\frac{273+t_T}{273}\right)^{1,5}, \quad (2.20)$$

де  $D_0 = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт дифузії водяної пари з вологої поверхні в теплоносії при нормальному тиску  $P_0 = 101325 \text{ кПа}$ .

Для описання дифузійної задачі перенесення вологи і визначення коефіцієнта масовіддачі  $\beta_d$  скористаємося дифузійними числами Прандтля і Нуссельта:

$$Pr_d = \frac{\mu_T}{\rho_T \cdot D}, \quad Nu_d = 0,145 Re_p^{0,5} \cdot Pr_d^{0,33}, \quad (2.21)$$

$$\beta_d = \frac{Nu_d \cdot D}{d_{\text{екв}}}, \quad (2.22)$$

де  $\mu_T = \mu_0 \cdot \frac{273}{273+t_T}$  – динамічна в'язкість теплоносія,  $\mu_0 = 2,04 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамічна в'язкість повітря при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Сушіння матеріалу діоксиду титану у вихровому псевдозрідженому шарі повністю відбувається в першому періоді, а випаровування вологи із поверхні пастоподібного матеріалу  $\text{TiO}_2$  відбувається так само як і з вільної поверхні рідини. Опір масопровідності всередині частинок матеріалу істотно не впливає на процес сушіння, швидкість  $\frac{dW}{d\tau}$  якого повністю визначається дифузією у зовнішній області. Тому коефіцієнт масопередачі в газовій фазі дорівнює коефіцієнту масовіддачі:

$$K = \beta, \quad K_p = \beta_p, \quad (2.23)$$

де  $\beta_p$  – коефіцієнт масовіддачі, що віднесений до різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$  і в ядрі газової фази,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}}$ .

Коефіцієнт  $\beta_p$  дорівнює [37]:

$$\beta_p = \frac{\beta_d}{R_{\Pi} \cdot t_T} \quad (2.24)$$

При цьому рівноважні параметри  $P_p, t_p, x_{1p}$  дорівнюють відповідним параметрам насиченої пари біля поверхні частинок матеріалу [24]:

$$P_p = P_s, \quad t_p = t_{\text{м.т.}}, \quad x_{1p} = x_{1s} \quad (2.25)$$

Масовий потік вологи із поверхні  $S$  частинок матеріалу діоксиду титану із врахуванням нерозривності потоку виражається [24, 26]:

$$j = \frac{dW}{S \cdot d\tau} = K_T \cdot (\bar{C} - C_p) = K \cdot (C_{\text{п.р.}} - C_{\text{п}}), \quad (2.26)$$

де  $dW$  – потік водяної пари;  $K_T, K$  – коефіцієнти масопередачі відповідно в твердій і газовій фазах;  $(\bar{C} - C_p), (C_{\text{п.р.}} - C_{\text{п}})$  – рушійні сили відповідно для твердої і газової фаз;  $\bar{C}, C_p$  – середня концентрація води в твердій фазі і на поверхні матеріалу відповідно;  $C_{\text{п.р.}}, C_{\text{п}}$  – концентрації водяної пари на поверхні матеріалу і в ядрі теплоносія відповідно;  $S$  – загальна поверхня частинок матеріалу діоксиду титану.

Враховуючи 2.23 рівняння 2.26 набуває вигляду [24]:

$$\frac{dW}{S \cdot d\tau} = \beta_d \cdot (C_{\text{п.р.}} - C_{\text{п}}), \quad (2.27)$$

Відповідно до рівняння стану ідеального газу, концентрація водяної пари пропорційна її парціальному тиску:

$$C_{\text{п}} = x_1 \cdot \rho_T = \frac{p_T}{R_{\text{п}} \cdot t_T}, \quad (2.28)$$

Із рівняння 2.28 парціальний тиск водяної пари в теплоносії виражається:

$$p_T = x_1 \cdot \rho_T \cdot R_{\text{п}} \cdot t_T, \quad (2.29)$$

В рівнянні 2.27 рушійна сила виражена через різницю концентрацій водяної пари на поверхні частинок  $\text{TiO}_2$  і в об'ємі теплоносія. Рушійна сила може бути виражена також через парціальний тиск водяної пари і рівняння 2.27 приймає вигляд для першого періоду сушіння:

$$\frac{dW_1}{d\tau} = \beta_p(t_T) \cdot S \cdot (P_s - p_T) \quad (2.30)$$

Аналіз рівняння 2.30 показує, що тривалість першого періоду сушіння можна продовжити збільшуючи вологу поверхню  $S$  матеріалу діоксиду титану. Оскільки в зоні диспергування матеріал безперервно подрібнюється,

то постійно зменшується еквівалентний розмір  $d_{\text{екв}}$ , агломератів і частинок пасти  $\text{TiO}_2$ , а поверхня  $S$  матеріалу збільшується.

Характерною величиною подрібнення являється ступінь подрібнення:

$$z = \frac{d_{\text{екв.0}}}{d_{\text{екв.i}}}, \quad (2.31)$$

де  $d_{\text{екв.i}}$  - поточний еквівалентний розмір агломерату або частинки матеріалу діоксиду титану.

Ступінь подрібнення залежить від часу подрібнення і визначається законом подрібнення [27]:

$$\frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z, \quad (2.32)$$

де  $K_z$  – коефіцієнт подрібнення, що залежить від конструкції диспергатора і природи матеріалу,  $\frac{1}{c}$ .  $K_z$  визначено експериментальним способом у 3 розділі даної роботи,  $K_z = 0,257 \frac{1}{c}$ .

В результаті інтегрування рівняння 2.32 отримано:

$$z = B + e^{K_z \cdot \tau_{\text{п}}}, \quad (2.33)$$

де  $\tau_{\text{п}}$  – час подрібнення;  $B$  – початкова кількість агломератів пасти  $\text{TiO}_2$ .

Із врахування 2.31 і 2.33 питома поверхня частинок діоксиду титану визначається,  $\text{м}^{-1}$ :

$$S = \frac{6 \cdot z}{\psi \cdot d_{\text{екв.0}}} \quad (2.34)$$

Утворена, в результаті подрібнення, поверхня частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$ , що висушується дорівнює,  $\text{м}^2$ :

$$dS = \frac{6 \cdot G_{\text{м}} \cdot dz(\tau_{\text{п}})}{\psi \cdot \rho_{\text{м}} \cdot d_{\text{екв.0}}}, \quad (2.35)$$

де  $G_{\text{м}}$  – кількість матеріалу, що висушується, кг.

Важливим елементом для моделювання процесу сушіння є рівняння енергії. Потік тепла на поверхні матеріалу  $\text{TiO}_2$ , що висушується в першому періоді сушіння, без врахування втрат дорівнює сумі потоків тепла на нагрівання матеріалу і на випаровування вологи:

$$dq = dq_1 + dq_2, \quad (2.36)$$

де  $dq$  – загальна тепловий потік, що надходить разом із теплоносієм;

$dq_1$  – тепловий потік для нагрівання матеріалу діоксиду титану;

$dq_2$  – тепловий потік для випаровування вологи з поверхні матеріалу.

Розпишемо складові рівняння 2.36:

$$\alpha_1 \cdot S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (t_{T_0} - t_{M.T.}) = G_M \cdot c_M(t_M) \cdot \frac{\partial t_M}{\partial \tau} + \frac{\partial W_1}{\partial \tau} \cdot r, \quad (2.37)$$

де  $q = \alpha_1 \cdot S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (t_{T_0} - t_{M.T.})$  – тепловий потік від теплоносія, Вт;

для першого періоду сушіння пасти  $TiO_2$ :

$$\frac{\partial t_M}{\partial \tau} = const, \quad \frac{\partial W_1}{\partial \tau} = const, \quad (2.38)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення,  $\frac{Дж}{кг}$ ;  $\frac{\partial W_1}{\partial \tau}$  – швидкість сушіння матеріалу діоксиду титану в першому періоді,  $\frac{кг}{с}$ ;  $t_M$  – температура матеріалу.

На основі рівняння 2.37 отримаємо залежність  $\frac{\partial t_M}{\partial \tau}$  зміни температури матеріалу  $TiO_2$  від часу сушіння,  $\frac{К}{с}$ :

$$\frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1 \cdot S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (t_{T_0} - t_{M.T.}) - \frac{\partial W_1}{\partial \tau} \cdot r}{G_M \cdot c_M(t_M)} \quad (2.39)$$

Запишемо в загальному випадку математичну модель процесу сушіння пасти діоксиду титану для зони диспергування із врахуванням 2.30-2.35 та 2.39:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1 \cdot S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (t_{T_0} - t_{M.T.}) - \frac{\partial W_1}{\partial \tau} \cdot r}{G_M \cdot c_M(t_M)} \\ \frac{dW_1}{d\tau} = \beta_p(t_T) \cdot S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (P_s - p_T) \\ \frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z \\ dS = \frac{6 \cdot G_M \cdot dz(\tau_{\Pi})}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{екв.0}} \end{cases} \quad (2.40)$$

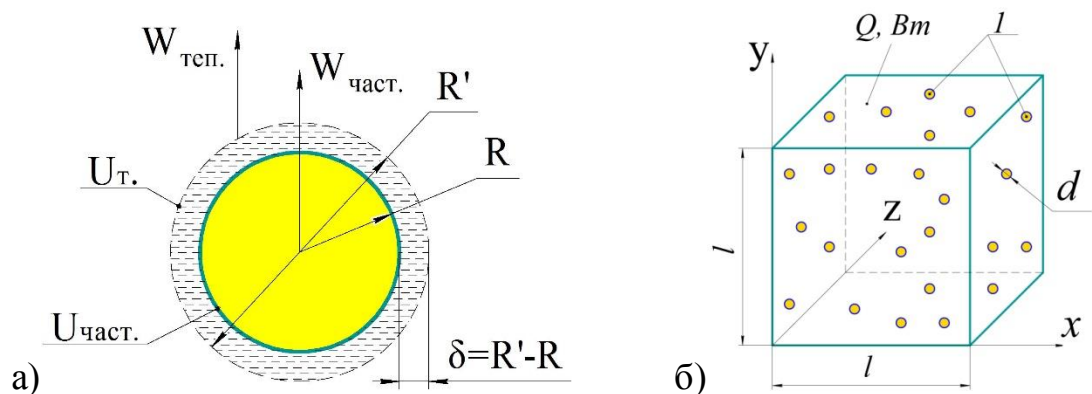
Початкові дані та умови для системи рівнянь (2.40):

$$\begin{cases} l_{\tau=0} = 0,003 \text{ м} \\ t_{T\tau=0} = t_{T_0} \\ t_{M\tau=0} = t_{M_0} \\ G_M = 10^{-4} \text{ кг} \\ w_0 = 46 \% \end{cases} \quad (2.41)$$

В першому періоді сушіння швидкість сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  лімітується величиною підведеного до матеріалу теплового потоку  $q$  і величиною масовіддачі  $\beta$  від поверхні шару частинок діоксиду титану в об'єм теплоносія.

*Математична модель процесу досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану.* Процес досушування в даному випадку відбувається в другому періоді із швидкістю сушіння, що безперервно зменшується  $\frac{\partial w_2}{\partial \tau} < \frac{\partial w_1}{\partial \tau}$ . В зону досушування потрапляють тонкодисперсні частинки діоксиду титану із розмірами 12–15 мкм. Для озрахунку їх еквівалентного діаметру  $d_{\text{екв.}}$  застосовувались рівняння (2.3–2.7). Коефіцієнт  $\psi$  становить 0,73, а коефіцієнт форми  $\Phi \approx 6$  [24].

Елементарні частинки діоксиду титану радіусом  $R$  (рисунок 2.29а), які мають початковий вологовміст  $U_{1кр}$ , сушаться в потоці теплоносія (рисунок 2.29б). В цьому випадку частинка матеріалу практично рухається зі швидкістю теплоносія і навколо неї утворюється парова плівка з якої відбувається дифузія пари в теплоносій, а рушійна сила процесу досушування визначається різницею концентрацій вологи  $\Delta C$  на поверхні частинки  $C_s$  і в потоці теплоносія  $C$ .



а) – граничний шар пари на волозій поверхні частинки діоксиду титану;

б) – виділений елементарний об'єм потоку теплоносія із рівномірно розподіленими частинками  $\text{TiO}_2$  в зоні досушування; 1 – тонкодисперсна частинка діоксиду титану

Рисунок 2.29 – Розподіл пари і частинок  $\text{TiO}_2$  в об'ємі теплоносія

Оскільки розміри тонкодисперсних частинок достатньо малі, їх парусність – відношення поверхні частинок до їх маси  $\theta = \frac{S_{\text{ч}}}{m_{\text{ч}}} = \frac{6}{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{екв.}}}, \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}$  настільки велика, що вони рухаються разом із потоком теплоносія з однаковою швидкістю. Відносна швидкість практично відсутня. За таких умов число Рейнольдса у рівнянні 2.15 обнуляється ( $Re_p = 0$ ) і число Нуссельта дорівнює  $Nu_d = 2$  [25]. Відповідно перенесення теплоти здійснюється молекулярною теплопровідністю, а маси – молекулярною дифузією.

Ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу діоксиду титану в процесі досушування становить:

$$\lambda_m = \lambda_{TiO_2}(t_m) \cdot (1 - w) + \lambda_{H_2O}(t_m) \cdot w \quad (2.42)$$

Для тонкодисперсних частинок з еквівалентним розміром  $d_{\text{екв.}} = 12..15 \text{ мкм}$  число  $Bi = \frac{\alpha_2 \cdot d_{\text{екв.}}}{\lambda_m}$  менше 0,1. Це свідчить, що градієнт температури в середині часток матеріалу практично відсутній.

Початкова температура теплоносія для умов процесу досушування в результаті змішування висхідного і низхідного вихрових потоків теплоносія визначається:

$$t_{T0}' = t_{T0} \cdot \frac{v_2}{v} + t_{T1} \cdot \frac{v_1}{v}, \quad v = v_1 + v_2, \quad (2.43)$$

де  $v$  – загальний потік теплоносія в зоні досушування;  $v_1$  і  $v_2$  – висхідний і низхідний потоки теплоносія відповідно (визначаються із матеріального і теплового балансів);  $t_{T1}$  – температура висхідного потоку теплоносія після зони диспергування і сушіння.

Оскільки швидкість тонкодисперсних частинок  $TiO_2$  відносно теплоносія практично відсутня, то коефіцієнт масовіддачі  $\beta_d'$  для умов процесу досушування приймає значення:

$$\beta_d' = \frac{2 \cdot D}{d_{\text{екв.}}} \quad (2.44)$$

Коефіцієнт дифузії вологи  $D$  залежить від температури і парціального тиску теплоносія [24]:

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P_T} \cdot \left(\frac{t'_T}{t_{T0}}\right)^{3/2}, \quad (2.45)$$

де  $t'_T$  – поточна температура теплоносія в зоні досушування.

Відповідно значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$  для умов процесу досушування дорівнює [24]:

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot \lambda_T}{d_{\text{екв.}}} \quad (2.46)$$

Для отримання рівняння енергії для умов процесу досушування розглянемо виділений об'єм куба ( $dl$ ,  $\text{м}^3$ ) потоку теплоносія (рисунок 2.29б), в якому сушаться тонкодисперсні частинки діоксиду титану, що рівномірно розподілені в об'ємі теплоносія, мають однаковий діаметр  $d_{\text{екв.}}$  та рухаються з однаковою швидкістю із теплоносієм. Нехай об'єм тонкодисперсних частинок діоксиду титану у виділеному об'ємі суміші становить  $y$ ,  $\text{м}^3_{\text{част.}}$ . Тоді об'єм, що займає теплоносій у виділеному об'ємі, становить  $1 - y$ ,  $\text{м}^3_{\text{т.}}$ .

Поверхня матеріалу діоксиду титану в умовах процесу досушування, очевидно, дорівнює утвореній кінцевій поверхні матеріалу в зоні диспергування:

$$S_{\text{дос.}} = S_{\text{дисп.}} = \sum_{i=0}^n \frac{\pi \cdot d_{\text{екв.}}^2}{4}, \quad (2.47)$$

де  $n$  – кількість тонкодисперсних частинок.

Кількість теплової енергії, що витрачається на нагрівання тонкодисперсних частинок діоксиду титану та випаровування води:

$$dq' = dq'_1 + dq'_2, \quad (2.48)$$

де  $dq'$  – загальний тепловий потік від суміші теплоносія, що складається із потоку теплоносія, який надходить в зону досушування із зони диспергування та свіжого потоку теплоносія в зону досушування;  $dq'_1$  – тепловий потік на нагрівання частинок матеріалу;  $dq'_2$  – тепловий потік на випаровування води із поверхні матеріалу.

Підставивши значення теплових потоків в 2.48 отримаємо:

$$\alpha_2(d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{T0} - t'_M) = y \cdot \rho_M(t'_M) \cdot c_M(t'_M) \cdot \frac{\partial t'_M}{\partial \tau} + y \cdot \rho_M(t'_M) \cdot w_{\text{ч}} \cdot \frac{\partial w_2}{\partial \tau} \cdot r, \quad (2.49)$$



де  $U_q$  – поточний вологовміст на поверхні частинок матеріалу;  $t'_m$  – поточна температура частинок матеріалу;  $\frac{\partial W_2}{\partial \tau}$  – швидкість сушіння матеріалу  $TiO_2$  в другому періоді,  $\frac{1}{c}$ .

З іншого боку запишемо кількість енергії, яку віддає теплоносій при контакті із поверхнею  $S_{\text{дос.}}$  тонкодисперсних частинок діоксиду титану:

$$dq'' = dq_1'' , \quad (2.50)$$

$$(1 - y) \cdot \rho_T(t'_T) \cdot c_T(t'_T) \cdot \frac{\partial t'_T}{\partial \tau} = \alpha_2(d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{T0} - t'_m) \quad (2.51)$$

Щільність потоку водяної пари, що мігрує із поверхні  $S_{\text{дос.}}$  тонкодисперсних частинок діоксиду титану в об'єм теплоносія визначається законом масовіддачі (закон Шукарева) [24]:

$$\frac{dW}{S_{\text{дос.}} d\tau} = \beta'_D(t'_T) \cdot (C'_{\text{в.п.}} - C_{\text{в.п.}}), \quad (2.52)$$

де  $dW$  – потік водяної пари;  $(C'_{\text{в.п.}} - C_{\text{в.п.}})$  – рушійна сила процесу масовіддачі;  $C'_{\text{в.п.}}$  і  $C_{\text{в.п.}}$  – концентрації водяної пари в плівці навколо поверхні частинок матеріалу і в потоці теплоносія відповідно.

У якості рушійної сили для умов процесу досушування в рівнянні 2.52 може бути різниця вологовмістів:

$$\Delta c_x = U_q - x'_T, \quad (2.53)$$

$$x'_T = x'_{T0} + \Delta x, \quad (2.54)$$

де  $x'_T$  – поточний вологовміст теплоносія в зоні досушування;  $x'_{T0}$  – початковий вологовміст теплоносія в зоні досушування в результаті змішування висхідного і низхідного вихрових потоків теплоносія,  $x'_{T0} = x_0 \cdot \frac{v_2}{v} + x_1 \cdot \frac{v_1}{v}$ ;  $\Delta x$  – приріст вологовмісту в об'ємі теплоносія.

Коефіцієнт масовіддачі  $\beta_x, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ , що віднесений до різниці вологовмістів на поверхні тонкодисперсних частинок  $U_q$  і об'єму теплоносія  $x'_T$  для умов процесу досушування визначається:

$$\beta_x = \frac{\beta'_D \cdot p'_T}{R_T \cdot t'_T}, \quad (2.55)$$

де  $p'_T$  – парціальний тиск водяної пари у теплоносії визначається  $p'_T = x'_T \cdot \rho_T \cdot R_{\Pi} \cdot t'_T$

Враховуючи твердження 2.53-2.55 і той факт, що товщина плівки навколо частинки  $\delta \rightarrow \infty$ , масовий дифузійний потік водяної пари записується у вигляді:

$$\frac{dW_2}{d\tau} = \beta_x(t'_T) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (U_{\text{ч}} - x'_T), \quad (2.56)$$

Запишемо на основі рівнянь (2.49, 2.51 і 2.56) загальну математичну модель для умов процесу досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial t'_M}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2(d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{T0} - t'_M)}{y \cdot \rho_M(t'_M) \cdot c_M(t'_M)} - \frac{\frac{dW_2}{d\tau} \cdot r}{c_M(t'_M)} \\ \frac{\partial t'_T}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2(d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{T0} - t'_M)}{(1-y) \cdot \rho_T(t'_T) \cdot c_T(t'_T)} \\ \frac{dW_2}{d\tau} = \beta_x(t'_T) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (U_{\text{ч}} - x'_T) \end{cases} \quad (2.57)$$

Запишемо початкові дані та умови до системи рівнянь (2.57):

$$\begin{cases} l'_{\tau=0} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м} \\ t'_{T\tau=0} = t'_{T0}, t'_{M\tau=0} = t'_{M0}, \\ U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг/кг} \end{cases} \quad (2.58)$$

де  $t'_{M0}$  – температура матеріалу на вході в зону досушування.

В другому періоді сушіння швидкість  $\frac{dW_2}{d\tau}$  лімітується швидкістю випаровування адсорбційно-зв'язаної вологи.

## 2.4 Розв'язання математичної моделі

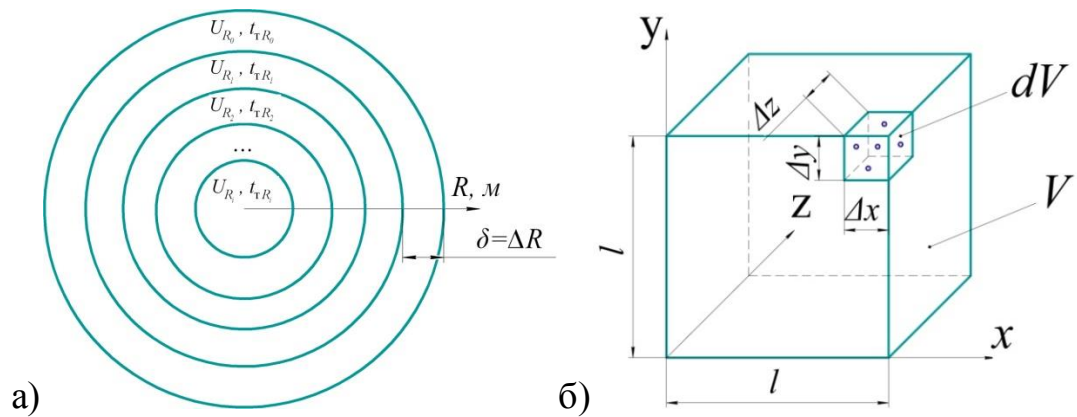
Метою розв'язання математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  є отримання загального теоретичного часу сушіння  $\tau_{\text{т.заг.}}$ , а також закономірності зміни значень вологовмісту і температури теплоносія  $x_i, t_{Ti}$  і матеріалу діоксиду титану  $U_i, t_{Mi}$  від часу сушіння  $\tau_i$ .

Для числового розв'язання сформульованих задач 2.40 і 2.57 скористаємося класичним методом Рунге-Кутти 4-го порядку для систем диференціальних рівнянь першого порядку, що має ряд переваг [34, 35]. Для

цього спочатку виконаємо дискретизацію розрахункової області з використанням рівномірного поділу на елементарні ділянки агломерату пасти діоксиду титану (рисунок 2.30а) та виділеного об'єму тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  із теплоносієм в умовах процесу досушування (рисунок 2.30б):

$$R = h(i - 1), i = 1..n, h = \frac{\delta}{n-1}, \quad (2.59)$$

де  $n$  – кількість ділянок поділу;  $h$  – крок інтегрування, м;  $R$  – радіус агломерату, м;  $\delta$  – визначальний розмір ділянки поділу.



а – поділ на елементарні ділянки агломерату пасти  $\text{TiO}_2$ ; б – поділ на елементарні ділянки виділеного об'єму тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  із теплоносієм в зоні досушування

Рисунок 2.30 – Схема поділу об'єктів математичного моделювання сушіння і досушування пасти  $\text{TiO}_2$

Алгоритм розв'язання систем диференціальних рівнянь (2.40 і 2.57) полягає у розрахунку вологовмістів  $U_{i+1}$  і температур  $T_{i+1}$  матеріалу діоксиду титану через  $U_i$  і  $T_i$  відповідно:

$$U_{i+1} = U_i + \int_0^{\tau_{\text{т.зар.}}} f(U, \tau) d\tau, \quad (2.60)$$

$$T_{i+1} = T_i + \int_0^{\tau_{\text{т.зар.}}} f(T, \tau) d\tau \quad (2.61)$$

За методом Рунге-Кутти функції  $f(U, \tau)$  і  $f(T, \tau)$  замінюються наближенням приросту функцій  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{h}{6} \sum_{m=1}^4 k_m, \quad (2.62)$$

де  $k_m$  – коефіцієнти, що визначаються на кожній ітерації розрахунку.

Коефіцієнти  $k_m$  для вологовмісту  $U$  і температури  $T$  розраховують наступним чином:

$$\begin{cases} k_1^U = f(\tau_0, U_0), k_1^T = f(\tau_0, T_0) \\ k_2^U = f\left(\tau_0 + \frac{h}{2}, U_0 + \frac{h}{2}k_1^U\right), k_2^T = f\left(\tau_0 + \frac{h}{2}, T_0 + \frac{h}{2}k_1^T\right) \\ k_3^U = f\left(\tau_0 + \frac{h}{2}, U_0 + \frac{h}{2}k_2^U\right), k_3^T = f\left(\tau_0 + \frac{h}{2}, T_0 + \frac{h}{2}k_2^T\right) \\ k_4^U = f(\tau_0 + h, U_0 + hk_3^U), k_4^T = f(\tau_0 + h, T_0 + hk_3^T) \end{cases} \quad (2.63)$$

де  $\tau_0$ ,  $U_0$  і  $T_0$  – відповідно початкові значення часу сушіння вологовмісту і температури матеріалу  $\text{TiO}_2$  і теплоносія (2.41 і 2.58).

Врезультаті використання коефіцієнтів 2.63 ітераційні рівняння для визначення, часу сушіння матеріалу, зміни вологовмістів і температур матеріалу  $\text{TiO}_2$  і теплоносія будуть мати вигляд:

$$U_{i+1} = U_i + \frac{h}{6} \sum_{m=1}^4 k_m^U, \quad (2.64)$$

$$T_{i+1} = T_i + \frac{h}{6} \sum_{m=1}^4 k_m^T, \quad (2.65)$$

$$\tau_{i+1} = \tau_i + h \quad (2.66)$$

Від кількості ділянок поділу  $n$  залежить кількість ітерацій і точність розрахунку систем диференціальних рівнянь, тому  $n > \sigma_i$ , де  $\sigma_i$  – похибка на одній ітерації розрахунку:

$$\sigma_i^U \approx \frac{U_{i+1, \frac{h}{2}} - U_{i+1, h}}{2^{p-1}}, \quad (2.67)$$

$$\sigma_i^T \approx \frac{T_{i+1, \frac{h}{2}} - T_{i+1, h}}{2^{p-1}}, \quad (2.68)$$

де  $\sigma_i^U$ ,  $\sigma_i^T$  – похибки розрахунку вологовмістів і температур на 1 ітерації;  $p = 4$  – порядок точності методу.

Після чого, значення кроку  $h$  для наступної ітерації визначають за наступним критерієм (при заданій величині точності  $\varepsilon$ , для даних розрахунків величина  $\varepsilon = 10^{-4}$ ):

1. Якщо  $|\sigma_i^U| > \varepsilon$  і  $|\sigma_i^T| > \varepsilon$ , то необхідна точність не досягнута і для підвищення ефективності розрахунку крок  $h$  слід зменшити в 2 рази;

2. Якщо  $|\sigma_i^U| < \varepsilon$  і  $|\sigma_i^T| < \varepsilon$ , то необхідна точність досягнута, але крок  $h$  занадто малий для підвищення ефективності розрахунку крок слід збільшити в 2 рази;
3. В іншому випадку крок  $h$  вибрано правильно і можна продовжувати розрахунки.

Результуюча похибка розрахунку методом Рунге-Кутти 4-го порядку залежить від складності даного алгоритму і на кожній ітерації має порядок  $h^5$ , а сумарна похибка на кінцевому інтервалі інтегрування має порядок  $h^4$ .

Вихідними даними для розв'язання математичної моделі є:

- спосіб сушіння (конвективний);
- умови теплообміну агломератів пасти діоксиду титану та тонкодисперсних частинок порошку  $\text{TiO}_2$  із теплоносієм (вимушена конвекція і теплопровідність);
- параметри пасти  $\text{TiO}_2$  (початкова температура на вході в сушильну камеру, початковий вологовміст  $U$  і вологість  $w$ , теплофізичні властивості пасти);
- параметри конвективного теплоносія – повітря (початкова температура на вході в сушильну камеру і кінцева температура на виході із камери, початкова відносна вологість  $\varphi$ , теплофізичні властивості повітря);
- параметри ножового диспергатора (частота обертання ножів, загальна ріжуча довжина ножів);
- параметри сушильного апарату (продуктивність по висушеній волозі із пасти діоксиду титану, теплові втрати установки);
- крок розрахунку по товщині елементарного шару агломерату пасти;
- величина елементарного виділеного об'єму тонкодисперсних частинок порошку діоксиду титану і теплоносія в зоні досушування;
- поле швидкостей руху газоподібного теплоносія і аеродинаміка потоків (вихрові потоки);
- поперечний перетин сушильної камери.

Точка переходу із першого періоду сушіння в другий, тобто величина першого критичного вологовмісту  $U_{1кр}$  визначається програмою розрахунку за умови, що швидкість сушіння  $\frac{dW}{d\tau}$  із постійної величини переходить у змінну, а саме коли  $\frac{|W_{i+1}-W_i|}{|\tau_{i+1}-\tau_i|} \neq const.$

Умовою закінчення розрахунку є досягнення заданого кінцевого значення вологовмісту і температури.

## 2.5 Результати числового розв'язання та їх аналіз

Алгоритм, блок-схема та програма розрахунку, таблиця ідентифікаторів, а також результати розрахунків знаходяться в додатку А.

Величина часу прогріву не перевищує величину похибки розрахунку, тому нею можна знехтувати і вважати, що сушіння відбувається відразу із першого періоду.

Значення вологовмісту матеріалу із врахуванням отриманих значень вологості  $W_{1i}$  отримано за виразом:

$$U_{1i} = \frac{W_{1i}}{S_M}, \quad (2.69)$$

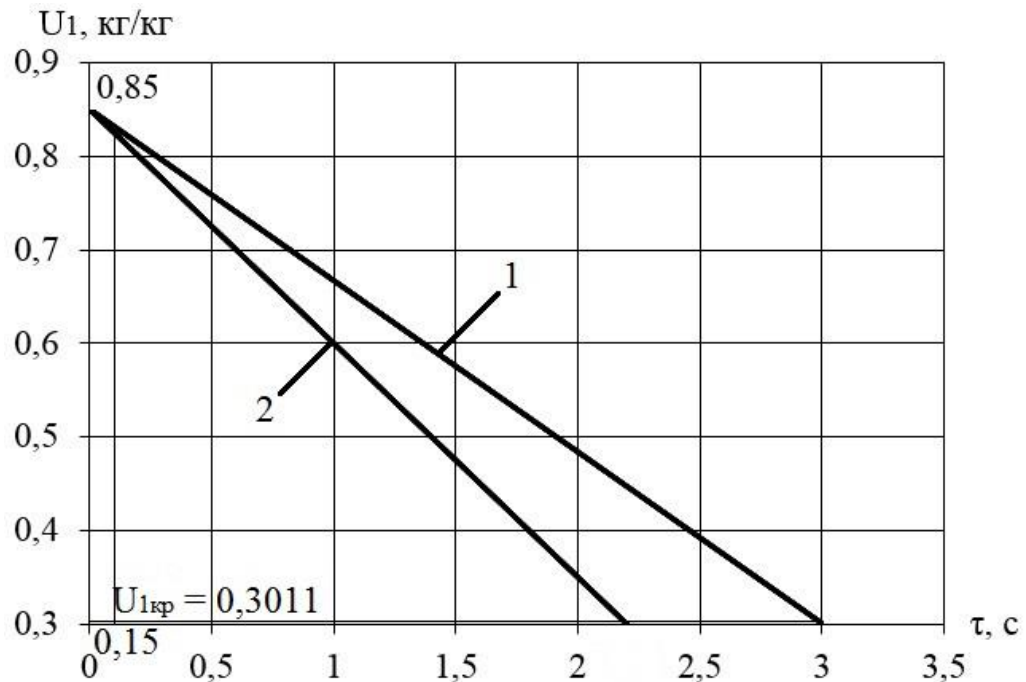
де  $S_M$  – сухість пасти матеріалу  $TiO_2$ .

За початкове значення кількості води в пасті діоксиду титану  $W_0$  взято відношення загальної кількості води в матеріалі до поверхні  $S$  матеріалу  $W_1 = 0,92 \frac{кг_в}{м^2}$ , при початковій вологості матеріалу  $w = 54\%$ :

$$W_1 = \frac{W_0}{S} \quad (2.70)$$

Результатом розрахунку математичної моделі, вираженої у вигляді системи рівнянь 2.40 є масиви розрахункових значень вологовмісту від часу сушіння агломерату пасти діоксиду титану при густинах теплового потоку  $6,3 \text{ кВт/м}^2$  (при температурі теплоносія на вході в сушильну камеру  $90^\circ\text{C}$ ) і  $8,7 \text{ кВт/м}^2$  (при температурі теплоносія на вході в сушильну камеру  $120^\circ\text{C}$ ), що охоплюють період прогріву і період сушіння із постійною швидкістю

сушіння  $\frac{dU_1}{d\tau}, \frac{1}{c}$ . Відповідно графічні залежності  $U_{1i} = f(\tau_i)$  цих значень показано на рисунку 2.31.



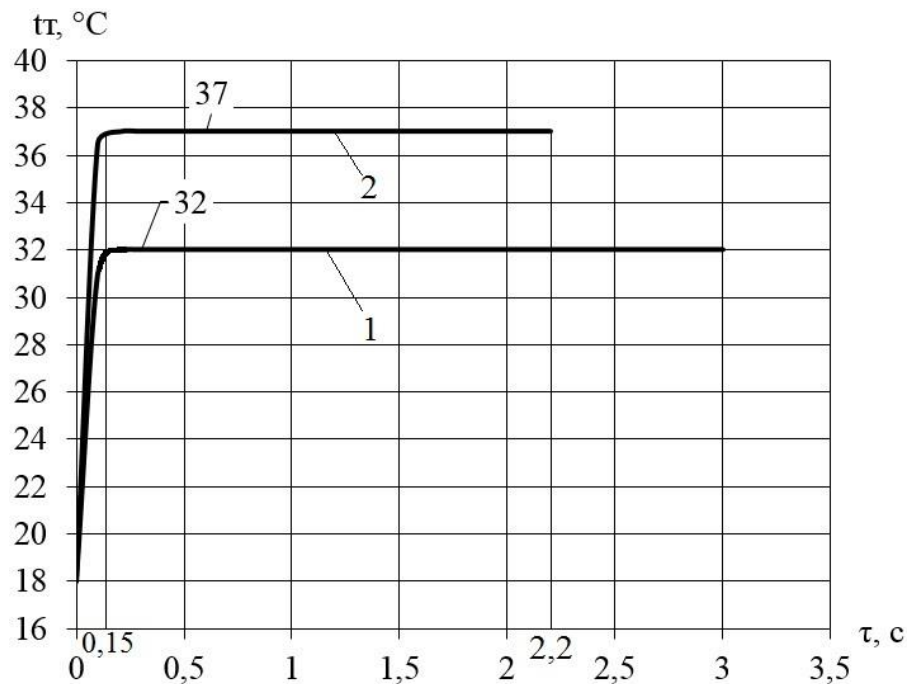
1 – при тепловому потоці  $q = 6,3$  кВт/м²;

2 – при тепловому потоці  $q = 8,7$  кВт/м²

Рисунок 2.31 – Залежності теоретичних значень вологовмісту від часу сушіння агломератів пасти діоксиду титану в першому періоді сушіння при різних питомих теплових потоках.

За густин теплового потоку 6,3 і 8,7 кВт/м² тривалість сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  від початкового вологовмісту  $U_0 = 0,85$  кг/кг до першого критичного вологовмісту  $U_{1кр} = 0,3011$  кг/кг становить 3 с та 2,2 с відповідно. Швидкість сушіння  $\frac{dU_1}{d\tau}$  в першому періоді становить 0,183 1/с (при тепловому потоці 6,3 кВт/м²) та 0,249 1/с (при тепловому потоці 8,7 кВт/м²). Із рисунку 2.31 видно, що за час сушіння  $\tau_1$  кількість води в пасті діоксиду титану зменшилася із початкового значення  $U_0 = 0,85 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м}}}$  до кінцевого  $U_{1кр} = 0,3011 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м}}}$ . Час сушіння першого періоду буде зменшуватися із збільшенням щільності теплового потоку  $q$ , підведеного теплоносієм.

Графік залежності теоретичних значень температури пасти діоксиду титану від часу сушіння зображений на рисунку 2.32.



1 – при тепловому потоці  $q = 6,3 \text{ кВт/м}^2$ ;

2 – при тепловому потоці  $q = 8,7 \text{ кВт/м}^2$

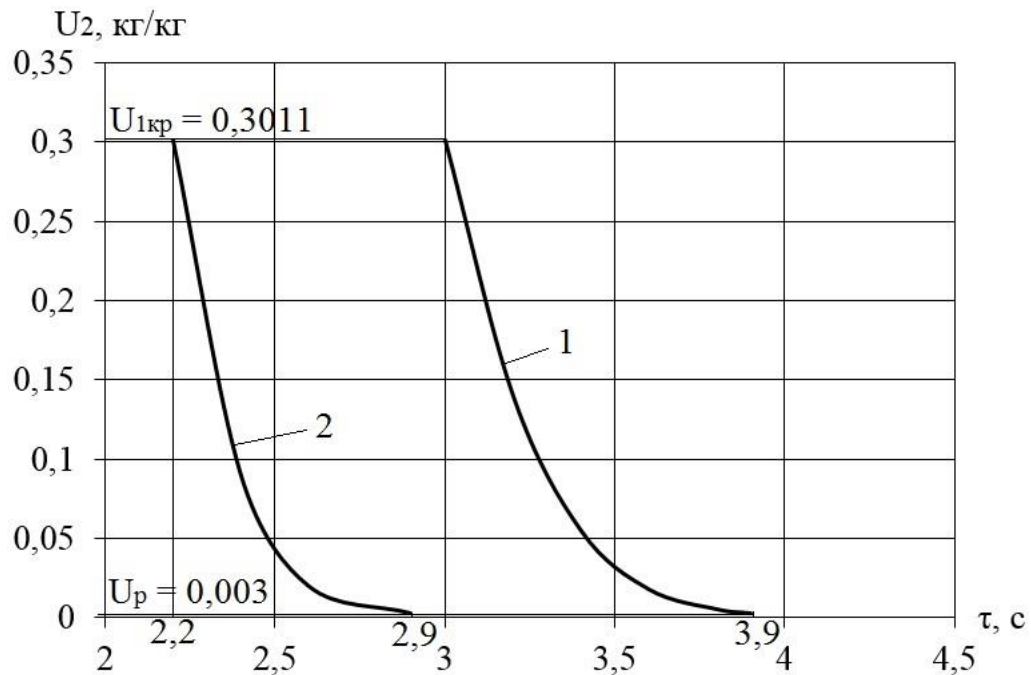
Рисунок 2.32 – Залежності значень температури пасти діоксиду титану від часу сушіння в перший період сушіння при різних питомих теплових потоках.

Сушіння в періоді сталої швидкості сушіння  $\frac{dU_1}{d\tau} = \text{const}$  відбувається при температурі мокрого термометра, яка складає  $32^\circ\text{C}$  для питомого теплового потоку  $6,3 \text{ кВт/м}^2$  і  $37^\circ\text{C}$  для  $8,7 \text{ кВт/м}^2$ .

За результатами розрахунку математичної моделі для зони досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  встановлено як змінюється вологовміст і температура частинок, а також температура теплоносія. Залежність вологовмісту від часу досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в другому періоді сушіння зображено на рис. 2.33. Як видно із рис. 2.33, швидкість досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  зменшується  $\frac{dU_2}{d\tau}$ , а кінцевий вологовміст продукту становить  $0,003 \text{ кг/кг}$ .



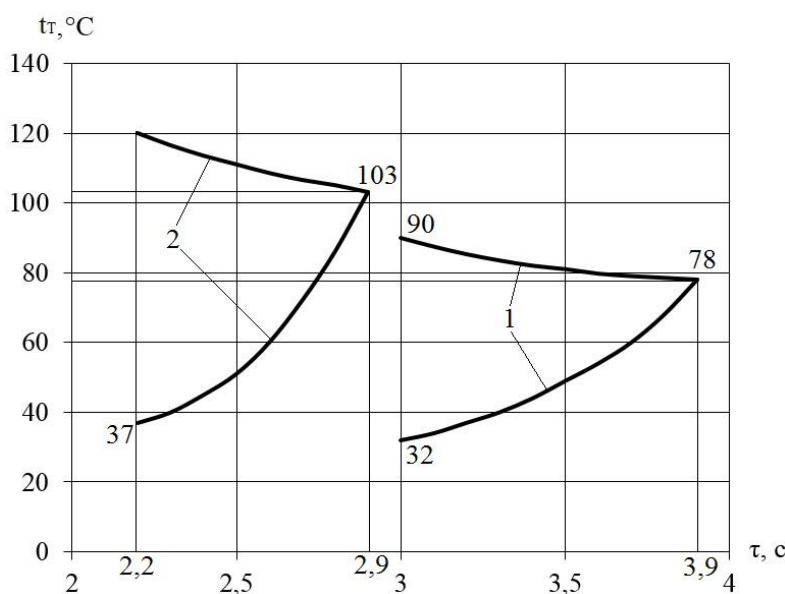
Загальний процес сушіння триває 2,9 с при тепловому потоку  $8,7 \text{ кВт/м}^2$  і 3,9 с при  $6,3 \text{ кВт/м}^2$ .



1 і 2 – при теплових потоках  $6,3 \text{ кВт/м}^2$  і  $8,7 \text{ кВт/м}^2$  відповідно

Рисунок 2.33 – Залежності значень вологовмісту від часу досушування пасти діоксиду титану в другому періоді сушіння для різних питомих теплових потоків

Залежність температури тонкодисперсних частинок діоксиду титану і теплоносія від часу досушування в зображено на рисунку 2.34.



2, 4 – температурні криві досушування  $\text{TiO}_2$ ;

1, 3 – температурні криві теплоносія

Рисунок 2.34 – Залежність температури тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  і теплоносія від часу досушування в другому періоді сушіння.

В результаті досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  теплоносієм при початковій температурі  $120\text{ }^\circ\text{C}$  і тепловому потоку  $8,7\text{ кВт/м}^2$  в кінці процесу при рівноважному вологовмісту продукту температури теплоносія і частинок вирівнюються і становлять  $103\text{ }^\circ\text{C}$ . А при початковій температурі теплоносія  $90\text{ }^\circ\text{C}$  і тепловому потоку  $6,3\text{ кВт/м}^2$  рівноважна температура становить  $78\text{ }^\circ\text{C}$ .

Наведені кінетичні залежності процесів сушіння пасти діоксиду титану та досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  відповідають теорії сушіння кристалічних дисперсних продуктів. Продукт  $\text{TiO}_2$  є відносно стійким до температур теплоносія, які можуть досягати  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , що дозволяє проводити процес сушіння при підвищених початкових температурах теплоносія  $300 - 350\text{ }^\circ\text{C}$ . Це спричиняє зменшення витрат теплоносія, а отже і енергозатрат на проведення процесу.

## Висновки до розділу 2

Згідно проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Сформульовано основні положення фізичної моделі процесів сушіння пасти діоксиду титану і досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$ .
2. Обґрунтовано механізми перенесення вологи із поверхонь агломерату пасти і тонкодисперсної частинки у потік теплоносія.
3. Складена математична модель процесу сушіння пасти діоксиду титану і досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$ . Математичне описання моделі в першому періоді сушіння ґрунтується на основному рівнянні масопереносу, рушійною силою при цьому виступає різниця парціальних тисків пари над поверхнею агломерату і в потоці теплоносія.
4. Складена математична модель процесу досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$ . Математичне описання моделі досушування продукту в другому періоді сушіння ґрунтується на законі масовіддачі (закон

Шукарєва), рушійною силою при цьому виступає різниця вологовмістів на поверхні частинки і в потоці теплоносія.

5. Встановлено, що швидкість сушіння в першому періоді лімітується величиною підведеного теплового потоку і швидкістю зовнішньої дифузії вологи, а в другому періоді швидкість сушіння лімітується швидкістю десорбції адсорбційно-зв'язаної вологи між кристалами тонкодисперсної частинки.

6. Отримані кінетичні залежності процесу сушіння пасти діоксиду титану відповідають теорії сушіння кристалічних тонкодисперсних продуктів.

## РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ

### 3.1 Мета і завдання експериментальних досліджень

Мета досліджень – експериментальна перевірка адекватності розробленої математичної моделі процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  і досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану до високої кінцевої сухості із застосуванням вихрових потоків теплоносія, а також підтвердження доцільності застосування зон диспергування та досушування у вихровій сушильній камері. Експериментальні дослідження виконані на базі розробленого та виготовленого обладнання кафедри МАХНВ, в тому числі під час виконання ініціативної теми № 04/15 IXФ «Процес сушіння дрібнодисперсної пасти діоксиду титану».

Тонкодисперсний порошок  $\text{TiO}_2$  висушують до залишкової вологості відповідно до ДСТУ [68] або ТУ. Кінцеве значення вологості флютингу згідно ГОСТ 9808-84 становить 0,3 %. Надлишкова кінцева волога може спричинити погіршення якісних показників кінцевого матеріалу.

Максимальне значення температури порошку діоксиду титану під час сушіння в ДСТУ не вказано. Проте високотемпературний режим сушіння може погіршити фізико-механічні характеристики  $\text{TiO}_2$ , які зазначено в ДСТУ 9808-84 та призвести до зміни забарвлення із білого на жовте, що є неприпустимим. Рекомендоване максимальне значення температури діоксиду титану має не перевищувати 140-150°C [69].

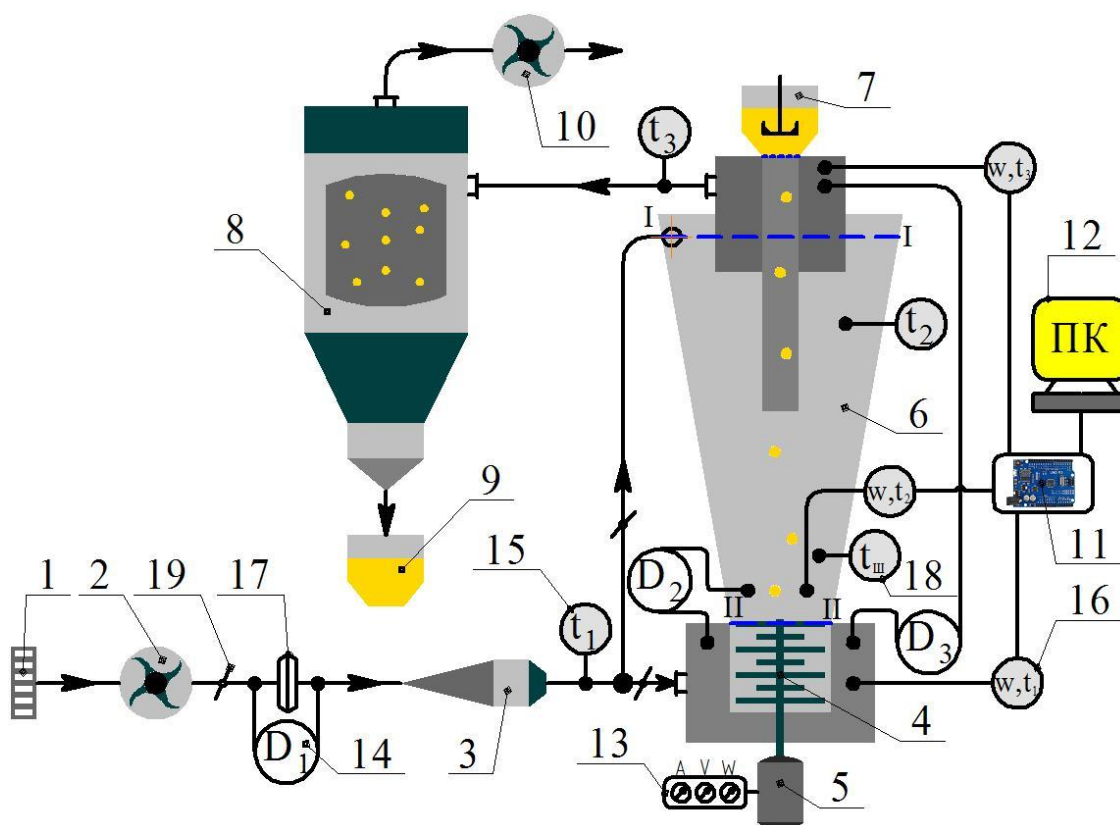
Розрахований час сушіння дозволяє визначити час перебування матеріалу в сушильній камері, а звідси основні геометричні розміри сушильного апарату.

Сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  є тепло- і масообмінним процесом. Тому згідно математичного описання процесів сушіння та досушування діоксиду титану із застосуванням вихрових потоків теплоносія (розділ 2) для перевірки

адекватності математичної моделі обрано такі параметри: вологовміст, температура та час.

### 3.2 Опис експериментальної установки

Схема експериментальної сушильної установки показано на рисунку 3.1.

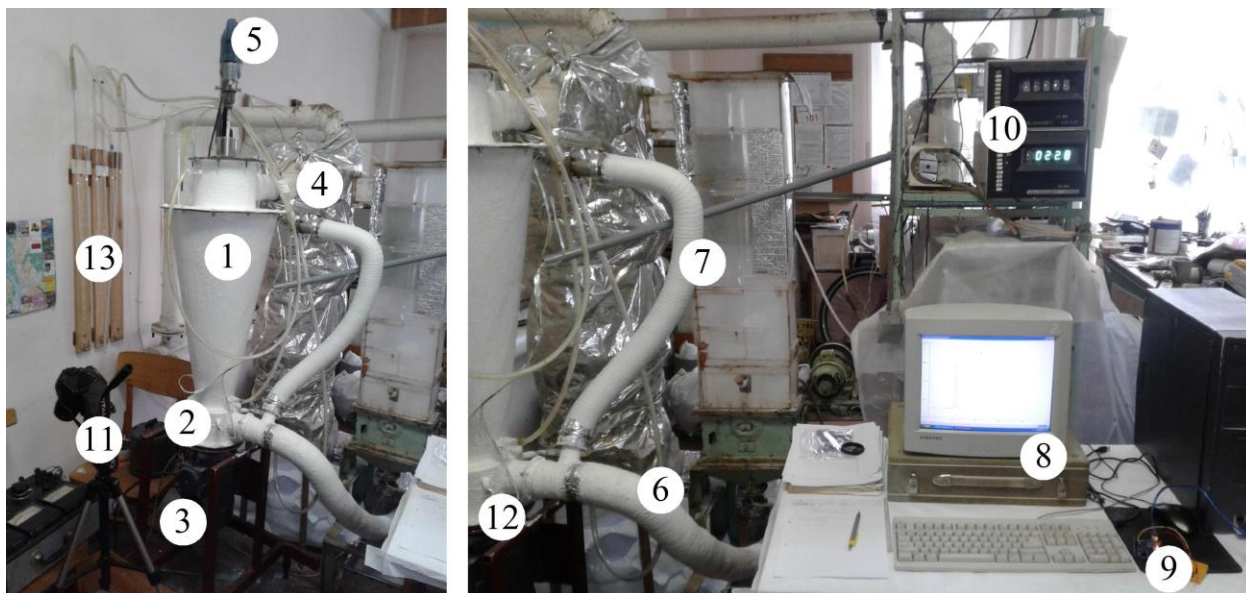


- 1 – повітряний фільтр; 2 – нагнітаючий вентилятор; 3 – калорифер електричний; 4 – диспергатор; 5 – привід диспергатора; 6 – сушильна вихрова камера; 7 – живильник-дозатор; 8 – рукавний фільтр;  
 9 – вивантажувальний бункер; 10 – витяжний вентилятор;  
 11 – мікроконтролер Arduino UNO R3; 12 – персональний комп'ютер;  
 13 – вимірювальний комплекс типу K50 №1654;  
 14 – дифманометри (1–3); 15 – термопари (1–4); 16 – датчики-модулі температури і вологості GY-21 HTU21; 17 – діафрагма; 18 – температурний датчик PT100; 19 – шибер регулюючий

Рисунок 3.1 – Схема експериментальної сушильної установки

Експериментальна сушильна установка призначена для дослідження кінетичних закономірностей процесів сушіння, досушування та подрібнення тонкодисперсної пасти діоксиду титану із застосуванням вихрових потоків теплоносія. У якості теплоносія використовувалося нагріте повітря.

Фото експериментальної установки показано на рисунку 3.2.

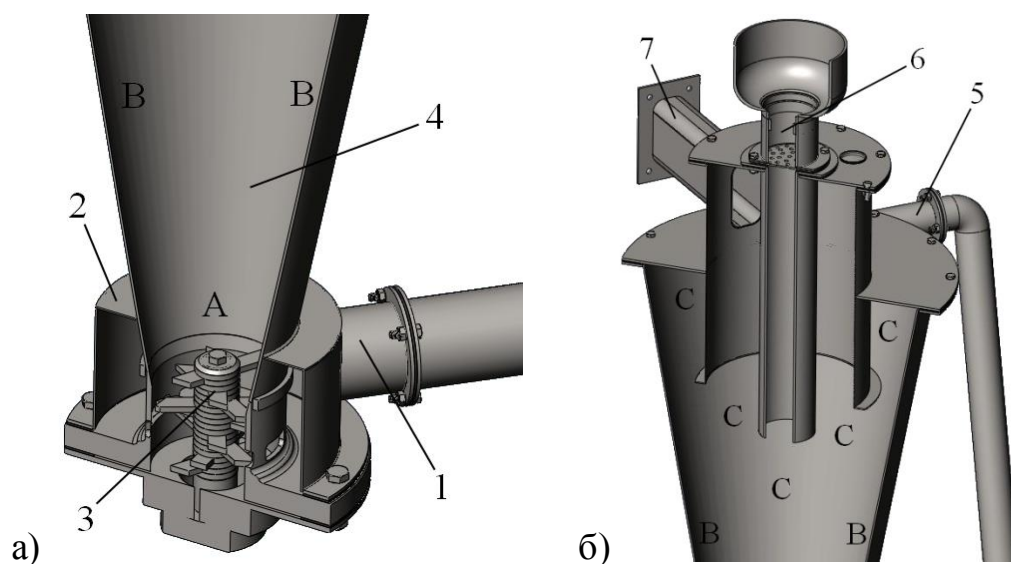


- 1 – сушильний апарат; 2 – диспергатор; 3 – привід диспергатора;  
 4 – рукавний фільтр; 5 – живильник-дозатор; 6 – загальний підвід теплоносія;  
 7 – підвід теплоносія на досушування; 8 – персональний комп'ютер;  
 9 – мікроконтролер Arduino UNO R3; 10 – блок КВП; 11 – відеокамера;  
 12 – датчики температури та вологості; 13 – дифманометри

Рисунок 3.2 – Фото експериментальної сушильної установки

Процес випаровування води із поверхні частинок пасти діоксиду титану відбувається за рахунок підведення теплового потоку у вихровий сушильний апарат (рисунок 3.3) за допомогою теплоносія, яким є повітря, що нагрівається у електричному калорифері (рисунок 3.4). Вологий матеріал подається в середину сушильної камери 4 за допомогою живильника 6. В першій зоні А відбувається диспергування пастоподібного матеріалу  $\text{TiO}_2$  із одночасним покриттям його вологої поверхні вже підсушеним порошком і висушування поверхневої води. В другій пристінній зоні В відбувається розділення твердої дисперсної фази під дією відцентрових сил і радіального

потіку теплоносія на вологі агломерати і підсушену тонкодисперсну фракцію частинок. Далі фракція вологих агломератів переміщується пристінним потоком теплоносія в зону диспергування А. Тонкодисперсна фракція підсушених частинок переміщується радіальним потоком теплоносія в зону досушування С, після чого потрапляє у вихідний патрубок і виводиться із сушильної камери.



а – нижня частина сушильного апарату; б – верхня частина апарату

А – зона диспергування; В – зона сепарації; С – зона досушування

1 – патрубок для подачі теплоносія в зону подрібнення; 2 – дифузор;

3 – диспергатор; 4 – сушильна камера; 5 – патрубок для подачі

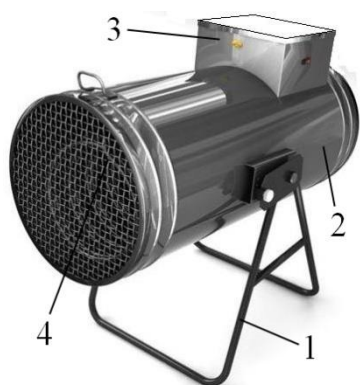
теплоносія в зону подрібнення; 6 – живильник для подачі вологого матеріалу;

7 – патрубок для відведення суміші відпрацьованого теплоносія і матеріалу

Рисунок 3.3 – Зони сушильного апарату

Основний потік теплоносія подається у нижню частину сушильної камери (рисунок 3.3а) через патрубок 1 і дифузор 2, який розподіляє потік теплоносія і направляє його в диспергатор 3. Ножі ротора диспергатора закручують даний потік теплоносія у вихровий потік за напрямком обертання ножів. Одночасно у верхню частину сушильної камери (рисунок 3.3б) тангенційно через патрубок 5 вводиться теплоносій на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$ .

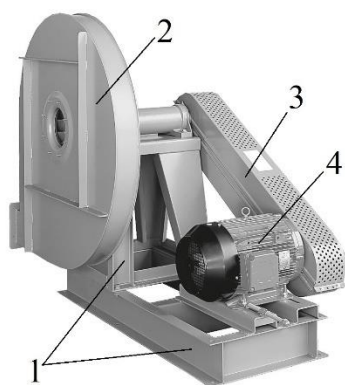




1 – опора; 2 – корпус; 3 – реле; 4 – спіраль

Рисунок 3.4 – Конструкція електричного калорифера

Номінальна потужність калорифера є паспортною величиною і становить 15 кВт. Величина густини теплового потоку теплоносія регулювалась за допомогою реле 3. Увімкнення і вимкнення калорифера відбувається лише при включених вентиляторах, що забезпечує проходження потоку повітря через нагріту спіраль пристрою. Подача теплоносія – повітря відбувається за допомогою двох відцентрових вентиляторів (рис. 3.5), що обертаються за допомогою клинопасової передачі від електродвигуна потужністю 5 кВт та частотою обертання 3270-3785 об/хв. Один із вентиляторів – нагнітаючий, а інший – витяжний.



1 – рама; 2 – вентилятор; 3 – клинопасова передача; 4 – електродвигун

Рисунок 3.5 – Конструкція відцентрового вентилятора

За технічним паспортом максимальний тиск на нагнітанні вентилятора досягає 32 кПа, а продуктивність при нагнітанні становить 650 – 720 м<sup>3</sup>/год.

Дійсна електрична потужність, що витрачається на подрібнення матеріалу ножами диспергатора (рисунок 3.7), сила струму та напруга на приводі диспергатора вимірювались вимірювальним комплектом типу К50 №1654 (рисунок 3.6) із номінальною областю частот від 45 до 65 Гц.



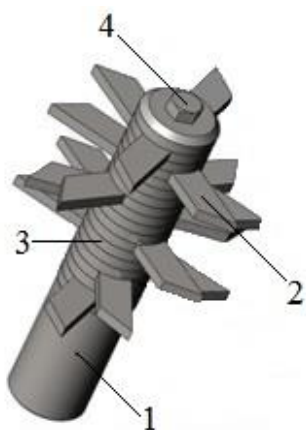
Рисунок 3.6 – Вимірювальний комплект типу К50 № 1654.

Під час проведення експериментальних досліджень подрібнення пасти діоксиду титану було встановлено, що потужність холостого ходу диспергатора дорівнює 80 Вт, а сила струму становить 3,5 А.



У корпусі комплексу змонтовані такі прилади, як амперметр Е59К і вольтметр Е59К, ватметр Д539К, трансформатор струму, опору, фазопоказчики і п'ять перемикачів.

Головним ріжучим елементом диспергатора являються ножі (рисунок 3.7), що закріплені на валу обертання, а між ножами розміщені дистанційні шайби. Потужність і частота обертання електроприводу диспергатора є паспортними величинами і становлять 3 кВт і 2850 об/хв. відповідно.



1 – вал; 2 – ріжучі елементи; 3 – дистанційна шайба; 4 – болт для кріплення ножів

Рисунок 3.7 – Ножі диспергатора.

Експериментальна установка дозволяє вимірювати такі параметри: витрати теплоносія, час сушіння, температуру та вологість вихрових потоків теплоносія, електричну потужність, що витрачається на подрібнення матеріалу  $\text{TiO}_2$ , витрату теплоносія, перепади тисків теплоносія на диспергаторі і на всьому об'ємі сушильної камери.

Однією із найважливіших складових проведення експериментальних досліджень є процес вимірювання, адже без правильно підібраного методу вимірювання та надійних вимірювальних приладів не можливо отримати достовірну інформацію про об'єкт дослідження. Сучасна наука має справу зі складними процесами сушіння та досушування і сушильними системами, що характеризуються багатьма параметрами і нелінійними співвідношеннями між ними. Отримання об'єктивних результатів експериментів сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  обмежено можливостями органів чуття людини. Зокрема людська реакція не дозволяє зафіксувати тривалість процесів, які протікають з високою швидкістю, і навпаки, при повільному процесі дуже важко помітити зміну деяких параметрів, наприклад зміну температури і вологості вихрових потоків. Подолати такі обмеження дозволяють сучасні інформаційні та комп'ютеризовані технології. Тому основні кінетичні параметри процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  – вологовміст і температура вихрових потоків теплоносія

і дисперсного продукту вимірювались за допомогою датчика-модуля вологи і температури GY-21 HTU21 (рисунок 3.8), в якому застосовується мікросхема із інтерфейсом I2C, яка забезпечує промислову точність вимірювань.

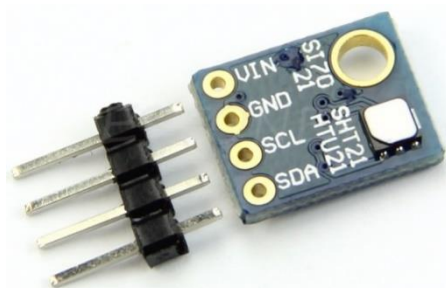


Рисунок 3.8 – Датчик-модуль GY-21 HTU21 для вимірювання температури і вологості.

Діапазон робочої напруги датчика становить від 1,9 до 3,6 В, напруга живлення дорівнює 5-6 В, а струм в активному режимі і в режимі очікування становить 150 мкА і 60 пА відповідно.

Вимірювання температурних полів в об'ємі вихрових потоків теплоносія і продукту відбувалося із застосуванням хромель-копелевих термопар. Також для точного вимірювання температури теплоносія і вихрового шару матеріалу застосовувалися платинові водонепроникні терморезистори PT100 (рисунок 3.9), принцип роботи яких базується на вимірюванні електричного опору. Платина має позитивний коефіцієнт залежності опору від температури, а саме, з ростом температури зростає опір. Зміна опору від температури має лінійну залежність: 0,39 Ом за 1 °С.



Рисунок 3.9 – Температурний платиновий датчик-терморезистор PT100.

Номінальний опір є паспортною величиною і становить 100 Ом (при 0 °С). Розміри даного датчика дорівнюють 4 мм в діаметрі та 30 мм в довжину, а довжина приєднувального проводу становить 150 см.

Для перетворення сигналів датчиків у відповідні величини, запис і їх збереження на персональному комп'ютері відбувалося за допомогою мікроконтролера Arduino UNO R3 (CH340) (рис. 3.10). Мікроконтролер Arduino – відкрита платформа з відкритим кодом програм і бібліотек, яка дозволяє інтегрувати різного типу датчики, модулі та різні пристрої автоматизації управління процесами.

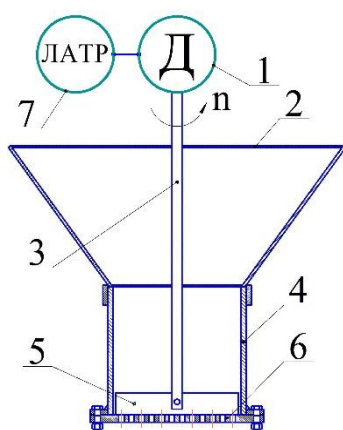


Рисунок 3.10 – Мікроконтролер Arduino UNO R3.

Для програмування мікроконтролера використовувалась спрощена версія мови програмування C++, а розробка програмного забезпечення велася з використанням середовища Arduino IDE. До основних характеристик мікроконтролера належать: частота – 16 МГц, оперативна пам'ять – 2 Кб, flash пам'ять програм – 32 Кб, робоча напруга на USB вході – 5 В, кількість аналогових і цифрових входів – 6 і 12 відповідно.

Конструкція і принцип дії оригінального сушильного апарату детально розглянуті в розділі 2, рис. 2.1. Як видно на фото рис. 3.2 поверхня сушильного апарату покрита сучасною теплоізоляційною фарбою, що представляє собою пастоподібну або рідку емульсію, що складається з порожнистих керамічних або полімерних мікросфер розміром до 80 мкм., заповнених інертним газом на латексній водорозчинній основі. Теплопровідність даного покриття становить 0,002 Вт/м·К, а коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні становить 1,5 Вт/м<sup>2</sup>·К.

При проведенні дослідів паста діоксиду титану завантажувалась в сушильну камеру за допомогою живильника (рисунок 3.11), який розміщений на верхній кришці сушильного апарату.



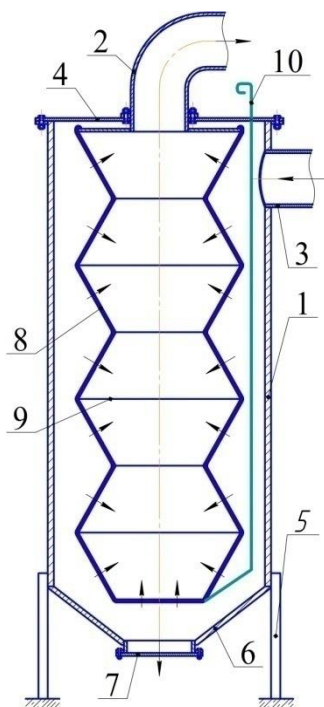
1 – електропривід; 2 – завантажувальний бункер;  
3 – вал; 4 – стакан; 5 – лопать; 6 – перфорована  
решітка; 7 – лабораторний трансформатор.

Рисунок 3.11 – Схема живильника для подачі пасту TiO<sub>2</sub>.

Паста діоксиду титану потрапляла до сушильної камери за допомогою обертання лопаті і протирання продукту через перфоровану решітку. Діаметр отворів решітки становить 3 мм. Потужність приводу живильника дорівнює 280 Вт, обертовий момент –

10 Нм, а максимальна частота обертів лопаті  $n = 750$  об/хв. Оскільки продуктивність живильника залежить від частоти обертів лопаті, то частота змінювалася за допомогою лабораторного трансформатора ЛАТР-2М, що дозволяє регулювати вторинну напругу в межах 0-250 В.

Для відділення відпрацьованого теплоносія і висушеного тонкодисперсного порошку діоксиду титану використовувався рукавний фільтр, схема якого зображена на рисунку 3.12. Всередині рукавного фільтру розміщений металевий каркас поверх якого натягнуте неткане фільтрувальне синтетичне полотно А20 (ЕУ2), товщина якого сягає 6-9 мм і воно може затримувати тонкодисперсні частинки до 1 мкм. Крім того дане полотно має можливість до регенерації, тобто легко очищається за допомогою механічного впливу на нього. Фільтруюча тканина може витримувати максимальну температуру запиленої суміші 150 °С, а її початковий опір знаходиться в межах 15-35 Па. Пилоємність даної фільтруючої тканини досягає 575 г/м<sup>2</sup>, а швидкість запилених потоків знаходиться в межах 1,5 м/с.



- 1 – корпус; 2 – патрубок відведення очищеного теплоносія; 3 – патрубок подачі запиленого теплоносія; 4 – верхня кришка; 5 – опора; 6 – бункер-збірник продукту; 7 – патрубок для вивантаження продукту; 8 – фільтрувальна тканина; 9 – металевий каркас; 10 – важіль для механічного струшування фільтрувальної тканини

Рисунок 3.12 – Схема рукавного фільтру.

Загальна площа фільтрувальної тканини складає 2,45 м<sup>2</sup>. Суміш відпрацьованого теплоносія і висушених тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  поступала через вхідний патрубок в простір рукавного фільтру, де відбувалася фільтрація теплоносія крізь тканину, а продукт залишався на її зовнішній поверхні. Фільтрування відбувалось при перепаді тисків, що створений витяжним вентилятором. Очищення рукава від продукту відбувалось за допомогою

важеля, який дозволяв струсити продукт в бункер-збірник, запобігаючи його налипанню. Вивантаження готового порошку діоксиду титану відбувалося після повної зупинки установки через вивантажувальний патрубок. Очищений відпрацьований теплоносій відводився в атмосферу.

### 3.3 Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювання

Під час створення експериментальної установки та розробки методик експериментальних досліджень процесів диспергування, сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  із застосуванням вихрових потоків теплоносія було поставлено завдання передбачити можливість змінення і контролювання параметрів диспергування, сушіння та досушування матеріалу діоксиду титану з необхідною точністю, а також забезпечення відтворюваності експерименту.

В основу вибору методів вимірювань величин і класів точності приладів було покладено відносну похибку вимірювання цих величин [75]. Для досягнення поставленого завдання на основі аналізу особливостей процесу сушіння встановлено необхідність контролювати такі параметри:

1) температуру вихрових потоків теплоносія і частинок  $\text{TiO}_2$  в зоні диспергування за допомогою платинового терморезистора РТ100 (рисунок 3.9) із діапазоном вимірюваних температур  $-20^\circ\text{C}$  до  $+500^\circ\text{C}$  та точністю вимірювання  $\pm 0,3 - 0,8^\circ\text{C}$ , частота вимірювання 60 Гц;

2) температуру і вологість вихрових потоків теплоносія на виході із зони диспергування та на виході із сушильної камери за допомогою датчика-модуля GY-21 HTU21 (рисунок 3.8), що має робочий діапазон для вологості від 0 до 100%, а для температури від  $-40$  до  $125^\circ\text{C}$ , при цьому точність вимірювання вологості становить  $\pm 2\%$ , а точність температури дорівнює  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ , частота вимірювання 60 Гц;

3) температури теплоносія на вході в зону досушування та в зону диспергування і температура в зоні досушування вимірювалися хромель-

копелевими термопарами в комплекті з електронним потенціометром А-565 із точністю  $\pm 0,5$  °С та частотою 1 замір за кожні 5 с експерименту;

4) електричну потужність, напругу і силу струму приводу диспергатора за допомогою вимірювального комплексу К50 (рисунок 3.6) з класом точності 0,2 згідно з ГОСТ 8711-78, похибка приладів комплексу становить  $\pm 0,5\%$  в номінальній області частот;

5) напругу в електричному калорифері за допомогою лабораторного вольтметра Э59/1 за ГОСТ 8711-60 з класом точності 0,5 (діапазон вимірювання 75В – 150В – 300В, ціна поділки 0,5 – 1 – 2 В, відповідно);

6) початкову вологість повітря за допомогою лабораторного гігрометру психрометричного ВІТ-2 з ціною поділки по сухому та мокрому термометрам 0,2 °С і діапазоном вимірювання 15 – 40 °С та визначенням відносної вологості в межах 20 – 93 % з дискретністю в 1 %;

7) початкову температуру повітря за допомогою лабораторного термометра (діапазон вимірювання 0 – 50 °С, ціна поділки 0,4°С);

8) перепади тиску  $\Delta P$  теплоносія за допомогою рідинного трубчастого U-подібного диференціального манометра із діапазоном вимірювання до 700мм. в. ст., ціною поділки 1 мм в. ст. та з точністю відліку в двох трубках  $\pm 1$  мм в. ст. При чому для уникнення значної похибки шкала дифманометра виготовлена із поділками рівними не 1 мм, а меншими – 0,9 мм;

9) еквівалентний розмір частинок на різних етапах диспергування за допомогою штангенциркуля типу ШЦ-1 ДСТУ ГОСТ 166:2009з класом точності 1 (діапазон вимірювання 0 – 150 мм, ціна поділки 0,01мм, похибка вимірювання 0,05 мм).

Аналіз похибок, що мали місце під час проведення експериментальних досліджень, і результати оцінювання відносних похибок засвідчили, що використані вимірювальні прилади дають можливість провести заміри величин у потрібних діапазонах з необхідною точністю (додаток Б).

### 3.4 Паста діоксиду титану для дослідження

Діоксид титану переважно виготовляється із титанових руд, такими як ільменіт  $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$  (38-61 %  $\text{TiO}_2$ ) та рутил (91-99 %  $\text{TiO}_2$ ), при використанні сульфатної/хлорної кислоти або золь-гель технології. Обидві форми, анатазна і рутильна можуть бути виготовлені одним із способів.

Для виявлення кінетичних закономірностей процесів диспергування, сушіння і досушування пасти  $\text{TiO}_2$  вирішено досліджувати зразки тиксотропної тонкодисперсної пасти (рис. 3.13) марки R-111 згідно ДСТУ ГОСТ 30333:2009, що були виготовлені на ПрАТ "Кримський ТИТАН" і надані для проведення досліджень. Паста характеризується початковою вологістю  $w = 54\%$  і густиною  $\rho = 2173 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  та тиксотропністю, що дозволяє зменшити в'язкість та збільшити текучість при механічному впливі.



Рисунок 3.13 – Зразок тиксотропної тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$  марки R-111.

Тиксотропність пасти – дуже важливий показник продукту, завдяки якому є можливість подавати дану пасту  $\text{TiO}_2$  в сушильну камеру при початковій сухості 80 %, використовуючи шнековий або лопатевий живильник-дозатор [7], в якому буде відсутнє налипання продукту.

#### 3.5.1 Експериментальні дослідження коефіцієнтів гідравлічного опору

Для розрахунку енергетичних затрат на транспортування теплоносія крізь зону диспергування та через простір сушильної камери були знайдені відповідні коефіцієнти гідравлічного опору. Теплоносій рухається через простір сушильної камери у вигляді закручений вихрових потоків. Спосіб формування вихрових потоків визначається способом подачі теплоносія, конструкцією сушильної камери та диспергатора. Попередніми

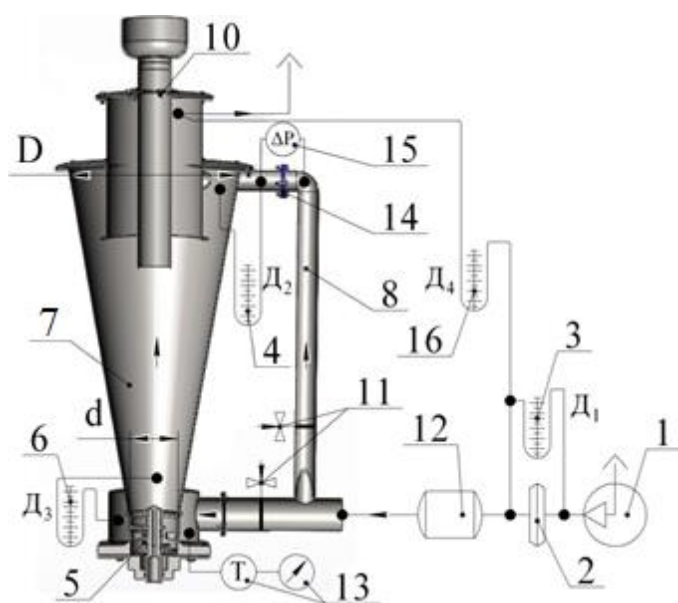


експериментальними і теоретичними дослідженнями [75, 76] було встановлено, що найбільш доцільною є конструкція конусоподібної сушильної камери із розміщеним у нижній частині диспергатором.

Відмінність розробленої конструкції сушильного апарату (рисунок 3.3) полягає у додатковій тангенціальній подачі теплоносія у верхню частину камери та у оригінальній конструкції диспергатора ножового типу із ефектом закручення потоків теплоносія. Кут конусності сушильної камери становить  $10^\circ$  та був розрахований за методикою розрахунку циклонів [56], для забезпечення принципів сепарації тонкодисперсних частинок продукту  $TiO_2$ .

Метою досліджень є визначення коефіцієнтів гідравлічного опору для зони диспергування, як місцевого опору, і для всієї сушильної камери.

Для проведення експериментальних досліджень був створений спеціальний експериментальний стенд, наведений на рисунку 3.14.



- 1 – нагнітаючий вентилятор;
- 2, 14 – камерні діафрагми;
- 3, 4, 6, 16 – дифманометри;
- 5 – диспергатор; 7 – сушильна камера; 8 – трубопровід для теплоносія в зону досушування;
- 10 – перегородка; 11 – шибер;
- 12 – калорифер; 13 – термопара з електронним потенціометром;
- 15 – датчик малих тисків

Рисунок 3.14 – Загальний вид дослідної установки для визначення коефіцієнтів гідравлічного опору.

Повітря нагнітаючим вентилятором нагніталось через калорифер, де прогрівалося до робочої температури  $90-120^\circ\text{C}$  для проведення процесів сушіння, в зону диспергування і в зону досушування. Перфорована пластина живильника перекривалася перегородкою. Для коректного визначення коефіцієнта гідравлічного опору для зони диспергування трубопровід для



подачі повітря в зону досушування перекривався шибером. При визначенні сумарного коефіцієнта гідравлічного опору шибер був повністю відкритим.

Загальні об'ємні секундні витрати повітря розраховувалися в системі MathCad 15 за допомогою функції лінійної інтерполяції дослідних даних:

$$V_{\text{сек}} = \text{interp}(\Delta P, W), \quad (3.1)$$

де  $V_{\text{сек}}$  – об'ємні витрати повітря на вході в сушильну камеру,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Delta P$  – дослідні дані перепаду тиску на камерній діафрагмі, що вимірювалися за допомогою дифманометра  $D_1$ , мм в. ст.;  $W$  – дослідні дані об'ємних витрат повітря, що відповідають значенням  $\Delta P$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Температура повітря вимірювалася безпосередньо перед диспергатором термopарою в комплекті з електронним потенціометром А-565 із точністю  $\pm 0,5$  °С. Перепади тиску повітря в зоні диспергування, досушування і сумарний перепад вимірювалися дифманометрами  $D_3$ ,  $D_2$  і  $D_4$  відповідно з точністю відліку в двох трубках  $\pm 1$  мм в. ст. Перепад тиску на камерній діафрагмі 14, що має коефіцієнт опору  $\xi_d = 1,6$ , вимірювався датчиком малих тисків MPXV7007DP з точністю  $\pm 0,1$  Па.

Динамічний перепад тиску розраховується за виразом, Па:

$$\Delta P = \xi \frac{w^2 \cdot \rho_{\text{п}}}{2}, \quad (3.2)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $w$  – комплексна швидкість руху повітря,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – густина повітря,  $\rho_{\text{п}} = f(t)$ ,  $t$  – температура повітря, °С.

Враховуємо:

$$A = \frac{w^2 \cdot \rho_{\text{п}}}{2} \quad (3.3)$$

Виходячи з цього перепад тиску повітря приймає вигляд:

$$\Delta P = \xi \cdot A \quad (3.4)$$

Швидкість повітря визначалася за виразом,  $\text{м}/\text{с}$ :

$$w = \frac{V_{\text{сек}}}{F_{\text{п.т.}}}, \quad (3.5)$$

де  $F_{\text{п.т.}}$  – сумарна поверхня перетину потоку теплоносія,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{п.т.1}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, F_{\text{п.т.2}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, F_{\text{п.т.3}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{с.к.}}^2}{4}, \quad (3.6)$$

де  $F_{п.т.1}$  – перетин зони диспергування, м<sup>2</sup>;  $F_{п.т.2}$  – перетин тангенційного патрубку подачі теплоносія в зону досушування, м<sup>2</sup>,  $F_{п.т.3}$  – середній перетин сушильної камери, м<sup>2</sup>.

Густина нагрітого повітря визначалась за формулою, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{п} = \frac{\rho_{н.у.} \cdot 273}{273 + t}, \quad (3.7)$$

де  $\rho_{н.у.}$  – густина повітря за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається за виразом:

$$\xi = \frac{\Delta P}{A} = \operatorname{tg} \alpha \quad (3.8)$$

Після запуску нагнітаючого вентилятору вмикається привід диспергатора та калорифер і повітря, нагріваючись до робочих температур, продувається через зону диспергування в робочий простір сушильної камери. Експериментальна графічна залежність перепаду тиску на диспергаторі від величини  $A$  зображена на рисунку 3.14.

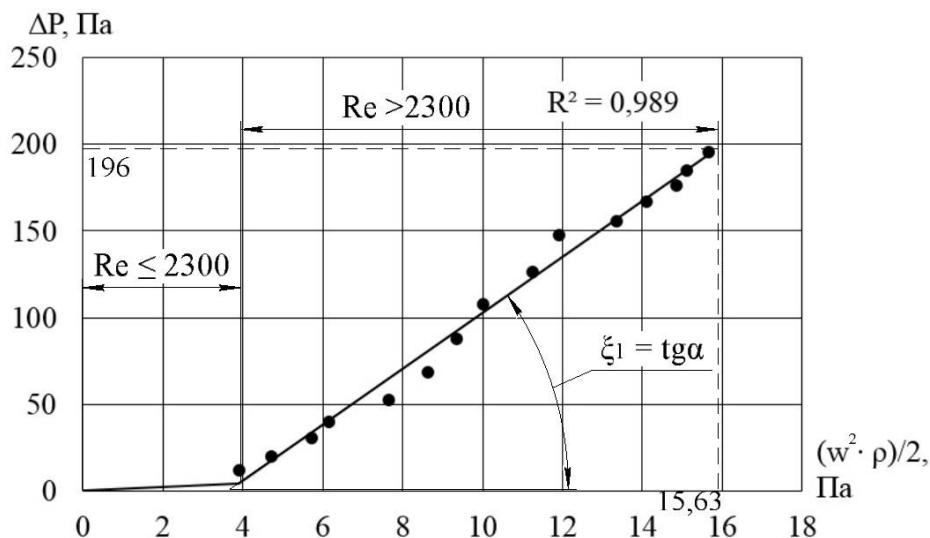


Рисунок 3.14 – Графічна залежність перепаду тиску на диспергаторі від величини динамічного напору

Після виходу на робочий тепловий режим, шибром встановлюємо витрати теплоносія на мінімум 20 м<sup>3</sup>/год та перекриваючи клапаном подачу теплоносія в зону досушування визначалася зміна перепаду тиску на дифманометрі  $D_3$  при поступовому збільшенні витрат теплоносія до

максимальної величини 150 м<sup>3</sup>/год. Вимірювання перепаду тиску відбувалося із кроком 10 м<sup>3</sup>/год. Дані даних вимірювань відображені в додатку Г.

Як видно із рисунку 3.14, залежність складається із зони ламінарної течії теплоносія, де критерій  $Re < 2300$  та турбулентної, де критерій  $Re > 2300$ . Відповідно коефіцієнт гідравлічного опору диспергатора становить:

$$\xi_1 = \frac{\Delta P}{(w^2 \cdot \rho)/2} = \frac{196}{15,63} = 12,54 \quad (3.9)$$

При аналогічних витратах та при перекритому каналі в зону диспергування визначалася зміна перепаду тиску на вході в закручений вихровий потік теплоносія зони досушування за допомогою дифманометра Д<sub>2</sub>. Отримана залежність перепаду тиску на виході із тангенційного патрубку від величини  $A$  для визначення коефіцієнта гідравлічного опору зображена на рисунку 3.15.

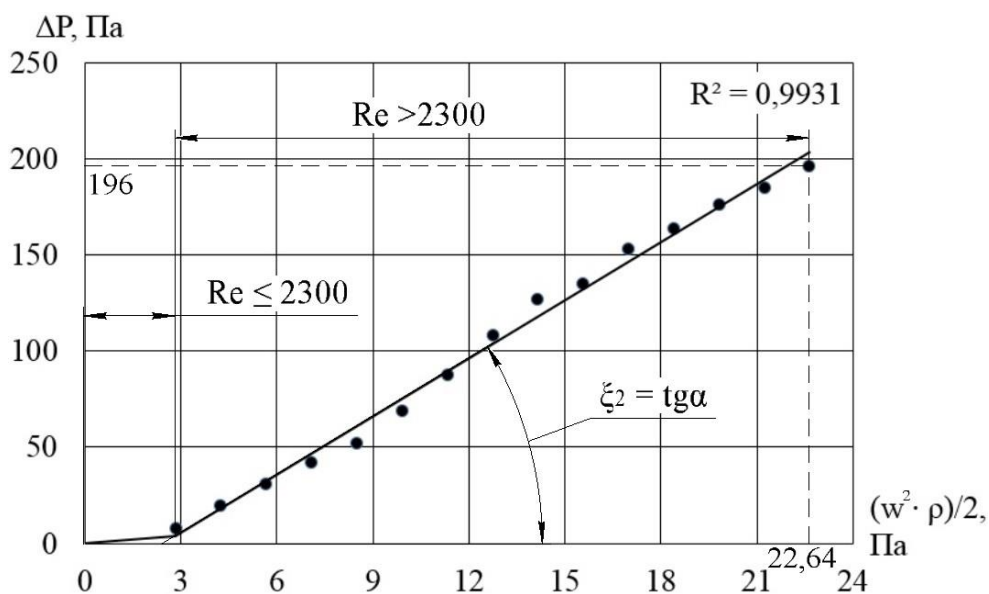


Рисунок 3.15 – Графічна залежність перепаду тиску на виході із тангенційного патрубку від величини динамічного напору

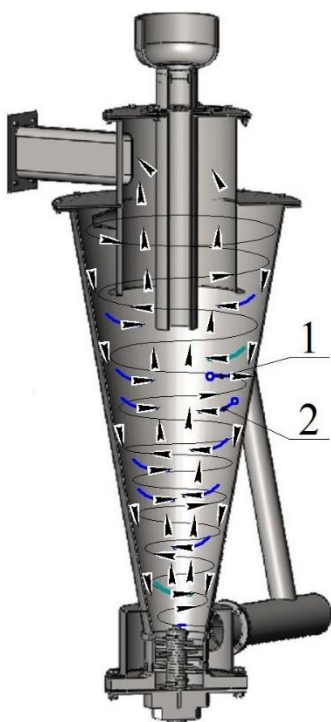
Розрахований коефіцієнт гідравлічного опору на виході із тангенційного патрубку становить:

$$\xi_2 = \frac{\Delta P}{(w^2 \cdot \rho)/2} = \frac{196}{22,64} = 8,66 \quad (3.10)$$

Отже розраховані значення коефіцієнтів гідравлічного опору сушильного апарату становлять  $\xi_1 = 12,54$  і  $\xi_2 = 8,66$  відповідно.

### 3.5.2 Обґрунтування конусоподібної конструкції сушильної камери

Метою експериментальних досліджень було визначення конструкції сушильної камери апарату, що забезпечить реалізацію двох режимного сушіння тонкодисперсної пасту  $\text{TiO}_2$  у закручених вихрових потоках теплоносія, спочатку агломератів в зоні диспергування, а потім досушування частинок у верхній частині апарату. Геометричні параметри камери, такі як висота конусу, діаметри основи та вузької частини, кут конусності, висота циліндричної частини безпосередньо впливають на створення сепараційної зони, що знаходиться на межі двох режимів та розділяє відповідні частинки продукту. На рисунку 3.16 наведено розподіл аеродинамічних сил конструкції сушильної камери.



1 – вектор відцентрової сили  $\overrightarrow{F_{\text{відц.}}}$ ;

2 – вектор аеродинамічної сили  $\overrightarrow{F_{\text{аерод.}}}$ .

Рисунок 3.16 – Схема розподілу аеродинамічних сил конструкції сушильної камери.

Дана конструкція забезпечує сепарацію тонкодисперсних частинок у наступному порядку:

1. Висхідний завихрений потік теплоносія, закручується ножами диспергатора і створює над ножами вихровий шар підсушеного продукту.
2. Дрібна фракція продукту із вихрового шару виноситься вертикальною складовою вихрового потоку.
3. З потоку, по мірі його підймання, випадають частинки сила тяжіння яких перевищує аеродинамічну силу.
4. Через дотичний патрубок в зону досушування подається тангенційний потік теплоносія, який інтенсивно обертається і створює тиск над поверхнею сушильної камери.

5. В результаті конічної форми сушильної камери тиск зменшується від верхнього патрубку до зони диспергування.
6. Частина верхнього вихрового потоку із радіальною швидкістю переміщається в центральний висхідний потік.
7. Тангенційна швидкість створює відцентрову силу  $\overrightarrow{F_{\text{відц.}}}$ , а радіальна складова швидкості створює аеродинамічну силу  $\overrightarrow{F_{\text{аерод.}}}$ .

Саме співвідношення відцентрової аеродинамічної сили визначається витратами теплоносія в зону диспергування і в зону досушування, а також ступенем закручування вихрових потоків:

$$i = \frac{w_{\text{тан.}}}{w_{\text{ос.}}}, \quad (3.11)$$

де  $w_{\text{тан.}}$  – величина тангенційної швидкості потоку теплоносія, м/с;

$w_{\text{ос.}}$  – величина осьової швидкості теплоносія, м/с.

### 3.6 Визначення значення критичного вологовмісту матеріалу діоксиду титану

Процес сушіння матеріалу  $\text{TiO}_2$  є двостадійний. Спочатку в зоні диспергування частинки пасти діоксиду титану сушаться в першому періоді сушіння від початкового вологовмісту  $U_0$  до першого критичного –  $U_{1\text{кр.}}$ . А потім досушуються в зоні досушування до рівноважного –  $U_p$ . Для розрахунку математичної моделі процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  та для визначення необхідних об'ємних витрат теплоносія в зони диспергування і досушування було експериментально визначено значення  $U_{1\text{кр.}}$ .

Для цього було взято зразки пасти діоксиду титану марки R-111 і проведені експериментальні дослідження процесу сушіння при різних теплових потоках:  $q_1 = 6,3 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$  та  $q_2 = 8,7 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ . Зразки матеріалу  $\text{TiO}_2$  мали різну початкову вологість: 1)  $w_1 = 50\%, U_1 = 1 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$ ; 2)  $w_2 = 40\%, U_2 = 0,67 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$ ; 3)  $w_3 = 30\%, U_3 = 0,43 \frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$ .

Під час сушіння із зони диспергування відбиралися зразки матеріалу діоксиду титану, зважувалися та визначався середній вологовміст.

Результати експериментальних досліджень представлено в таблиці 3.1.

№ п/п	Початкова вологість зразка матеріалу $\text{TiO}_2$ , %	Маса взятої проби матеріалу, кг	Вологовміст взятої проби матеріалу кг/кг
1	50	0,005	0,301
2	40	0,006	0,3012
3	30	0,005	0,3011

Середнє значення вологовмісту становить  $U_{1\text{кр}} = \frac{\sum_{i=1}^3 U_i}{3} = 0,3011 \text{ кг/кг}$ .

### 3.7 Дослідження подрібнення пастоподібного продукту діоксиду титану із використанням ножового диспергатора

Для визначення коефіцієнту подрібнення  $K_z, \text{с}^{-1}$  пастоподібного матеріалу діоксиду титану, що використовується при розв'язанні математичної моделі (див. розділ 2) процесу сушіння, були проведені експериментальні дослідження подрібнення пасти  $\text{TiO}_2$ .

Коефіцієнт подрібнення  $K_z$  залежить від часу подрібнення і визначається законом подрібнення [27]:

$$\frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z, \quad (3.12)$$

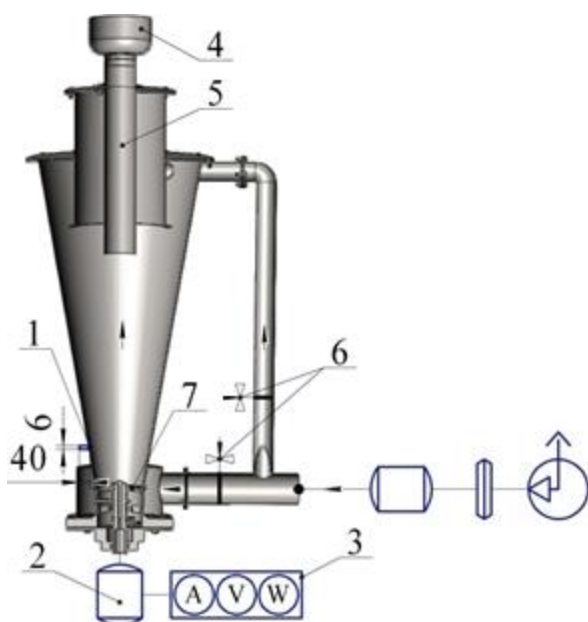
де  $z$  – ступінь подрібнення матеріалу діоксиду титану.

Ступінь подрібнення визначається:

$$z = \frac{d_{\text{екв.0}}}{d_{\text{екв.i}}}, \quad (3.13)$$

де  $d_{\text{екв.i}}$  – поточний еквівалентний розмір частинки матеріалу  $\text{TiO}_2$ ;  $d_{\text{екв.0}}$  – початковий еквівалентний розмір частинки  $\text{TiO}_2$  до подрібнення, за даними експерименту  $d_{\text{екв.0}} = 4 \text{ мм}$ .

Для проведення експериментальних досліджень був створений експериментальний стенд, схема якого показана на рисунку 3.15.



1 – патрубок для відведення зразків матеріалу  $\text{TiO}_2$ ; 2 – електропривід диспергатора; 3 – вимірювальний комплекс (амперметр, вольтметр та ватметр); 4 – завантажувальний бункер; 5 – направляюча труба; 6 – шибер; 7 – ножі диспергатора

Рисунок 3.15 – Загальний вид дослідної установки для дослідження процесу подрібнення пасти  $\text{TiO}_2$ .

Відповідно до методики проведення дослідження було відібрано 3 дослідні зразки пасти масою 0,3 кг, 0,6 кг і 1 кг. Оскільки в зоні подрібнення продукт висушується до першого критичного вологовмісту  $U_{1\text{кр}}$ , то доцільно проводити експериментальні дослідження саме із таким вологовмістом пасти  $\text{TiO}_2$ . Величина  $U_{1\text{кр}}$  для пасти діоксиду титану становить 0,23 кг/кг. Тому всі 3 дослідні зразки були підсушені від початкового вологовмісту  $U_0 = 0,96$  кг/кг до  $U_{1\text{кр}}$  в електронній печі СНО-5.10.5/10. Для визначення початкового вологовмісту  $U_0$  матеріалу дослідні зразки маркуються, висушуються в електронній печі до постійної маси та зважуються на прецизійних вагах.

Процес подрібнення відбувався разом із процесом сушіння, оскільки через систему калорифер, диспергатор, сушильний апарат та рукавний фільтр продувалося гаряче повітря із  $t = 120^\circ\text{C}$ . Живильник і філь'єра були повністю від'єднанні від сушильного апарату для можливості подачі всієї кількості зразка пасти діоксиду титану одночасно. Після запуску вентиляторів вмикався калорифер і після виходу на сушильний температурний режим вмикався привід диспергатора на фіксовану кількість

обертів  $n = 2850$  об/х відповідно паспорту трьохфазного електродвигуна АИР90L2У3 із стандартним виконанням на лапах. Сила струму, напруга та потужність електродвигуна вимірювались із використанням вимірювального комплексу типу К50 № 1654. Зміна показів амперметра та ватметра фіксувалися із використанням відеокамери Canon 600d із об'єктивом 18-55 kit, що має матрицю APS-C, 18 Мп. Сила струму холостого ходу електроприводу диспергатора становила  $I_{\text{х.х.д.}} = 3,5$  А. При цьому напруга на клеммах двигуна диспергатора становила  $U_{\text{д}} = 380$  В. А потужність холостого ходу диспергатора відповідно замірів  $N_{\text{х.х.д.}} = 80$  Вт.

Після подачі першого зразка пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,3 кг в сушильну камеру відеокамерою фільмувалася зміна показів вимірювальних приладів амперметра та ватметра відеокамерою до моменту виходу електроприводу диспергатора на холостий режим.

Зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,6 кг повністю подрібнюється за 51 с, а максимальне значення сили струму становить 4,68 А. Тоді для зразка масою 1 кг час повного подрібнення становить 87 с, а максимальне значення сили струму становить 5,32 А.

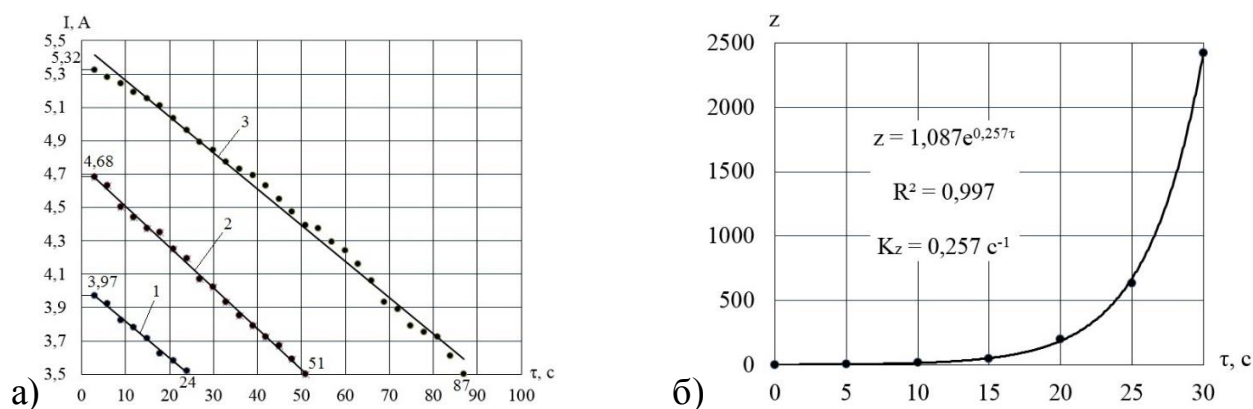


Рисунок 3.16 – Залежність зміни сили струму та ступеня подрібнення від часу подрібнення: 1 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,3 кг; 2 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,6 кг; 3 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 1 кг агломератів матеріалу  $\text{TiO}_2$  (а) та залежність зміни ступеня подрібнення від часу подрібнення (б)



Одночасно із фільмуванням показів амперметра кожні 5 с відбувався забір частинок подрібненого матеріалу через патрубок 1, що розміщений в зоні диспергування. Для отриманих частинок вимірювався штангенциркулем середній еквівалентний розмір  $d_{\text{екв.і}}$ .

Визначено, що залежність енергії, яка витрачається на процес подрібнення, є пропорційною до кількості матеріалу, який подрібнився (рис. 3.16а), що дозволило визначити залежність зміни ступеня подрібнення від часу подрібнення  $\tau$  та коефіцієнт подрібнення  $K_z = 0,257 \text{ с}^{-1}$ ), який залежить від природи матеріалу і використовується для розрахунку ступеня подрібнення  $z$  при величині достовірності апроксимації  $R^2 = 0,997$ . (рис. 3.16б):

$$\frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z, \quad z = B \cdot e^{K_z \cdot \tau}, \quad z = 1,087 \cdot e^{0,257 \cdot \tau}, \quad (9)$$

де  $B = 1,087$  – константа подрібнення.

### **3.8 Дослідження процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану**

#### **3.8.1 Методика проведення експериментальних досліджень сушіння продукту $\text{TiO}_2$**

Робота на експериментальній установці виконується в наступній послідовності:

1. Набираємо необхідну кількість пасти діоксиду титану, розмішуємо до гомогенного стану, робимо аналізи вологості та сухості.
2. Перевіряємо справність усіх вузлів сушильної установки.
3. Вмикаємо електроживлення.
4. Вмикаємо відсмоктуючий вентилятор.
5. Вмикаємо нагнітаючий вентилятор.

6. Після стабілізації величини розрідження в сушильній камері вмикаємо калорифер.
7. Виставляємо необхідну температуру сушильного агенту у вихровому шарі.
8. Прогріваємо сушильну камеру та рукавний фільтр до температури на виході із фонтануючого шару 60 – 70 °С.
9. Регулюючи витрати сушильного агенту на вході встановлюємо висоту фонтануючого шару 300 – 350 мм.
10. Фіксуємо витрати сушильного агенту, температуру на виході із фонтануючого шару та на вході в сушильну камеру, гідравлічний опір фонтануючого шару інертних тіл.
11. Вмикаємо живильник і починаємо подачу пасти діоксиду титану в сушильну камеру.
12. Виводимо сушильну установку на стаціонарний режим.
13. Заміряємо час роботи і витрати пасти та теплоносія. Продовжуємо записувати дані до журналу.
14. Заміряємо зміну температури на виході із шару та зміну гідравлічного опору шару. Дані записуємо до журналу.

Режим зняття кривої сушіння:

15. Різко зупиняємо подачу пасти діоксиду титану в сушильну камеру.
16. Через кожні 20 секунд заміряємо температуру на виході із шару та зміну гідравлічного опору шару. Дані записуємо в журнал.
17. Спостерігаємо процес сушіння пасти діоксиду титану та після повного закінчення процесу, вимикаємо калорифер и охолоджуємо сушильну установку.
18. Коли температура теплоносія впаде до 40 °С , то вимикаємо нагнітаючий та відсмоктуючий вентилятори.
19. Вимикаємо всі допоміжні прилади.
20. Вимикаємо електроживлення.
21. Дістаємо сухий матеріал із рукавного фільтру.

22. Зважуємо сухий порошок діоксиду титану на електронних вагах.

23. Прибираємо робоче місце.

Отриманий порошок діоксиду титану досліджуємо на залишкову вологу:

1. Робимо 3 зразки отриманого порошку діоксиду титану та зважуємо їх на електронних вагах.
2. Відправляємо зразки в сушильну шафу.
3. Після висушування виймаємо зразки із сушильної шафи та зважуємо на електронних вагах. Всі значення фіксуємо в журналі.
4. За отриманими величинами розраховуємо вологість та сухість отриманого матеріалу по формулі:

$$w = \frac{G_1 - G_2}{G_1 - G}, \quad (3.18)$$

$$s = 1 - W, \quad (3.19)$$

де  $G_1$  – маса зразка із тарою до висушування в сушильній шафі;

$G_2$  – маса зразка із тарою після висушування в сушильній шафі;

$G$  – маса тари.

Розрахунок напруження фонтануючого шару по висушеній волозі проводимо в такій послідовності:

1. Розраховуємо продуктивність сушарки по висушеній волозі:

$$G_{\theta} = \frac{M_n w_n}{\tau_c}, \quad (3.20)$$

де  $M_n$  – фіксоване значення кількості пасти діоксиду титану, що надходить в сушильну камеру;

$w_n$  – початкова вологість пасти діоксиду титану;  $\tau_c$  – час сушіння пасти діоксиду титану.

2. Розраховуємо напруження шару по висушеній волозі:

$$A = \frac{G_{\theta}}{F_{c.k.}}, \quad (3.21)$$

де  $F_{c.y.}$  – площа сушильної камери.

### 3.9 Результати та аналіз експериментальних досліджень

Результати експериментів відображені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати проведення експериментів

Час сушіння $\tau$ , с	$\Delta P_{diag}$ , Па	Температура, °C		Гідравлічний опір шару $\Delta P_{шару}$ , Па
		На вході	На виході	
0	1700	100	80	4850
60	1750	96	80	5000
120	1750	98	73,8	5050
180	1750	99,2	63,13	5030
240	1750	99,8	63,2	5020
300	1750	100,2	63,3	5000
360	1750	99,7	65,4	4990
420	1750	100,6	68,9	4970
480	1750	100,9	71	4960
540	1750	101,1	74,5	4950
600	1750	101,5	79,9	4940
660	1750	102	81,7	4930
720	1750	102,4	83,5	4930

Також було проведено досліди по визначенню зміни температури та вологовмісту пасти діоксиду титану від часу сушіння при різних температурах сушильного агента на вході в сушильну камеру, а саме при 100 °C, 110 °C та 120 °C. Результати досліджень відображені в таблиці 3.3. Для проведення дослідів було приготовано необхідну кількість пасти діоксиду титану  $TiO_2$ . Задане значення початкового вологовмісту пасти визначалося шляхом зважування зразків пасти до і після їх висушування в сушильній шафі при температурі 100 °C. Початковий вологовміст склав  $U_0 = 0,818 \frac{кг}{кг_{a.c.m.}}$ . Кінцевий вологовміст матеріалу склав  $U_0 = 0,0132 \frac{кг}{кг_{a.c.m.}}$ .

Таблиця 3.3 – Результати досліджень

Температура, °C		Температура, °C		Час сушіння $\tau$ , с
На вході	На вході	На вході	На вході	
110,1	80,3	121,3	80,5	0
109,3	80,7	123,3	82,1	60
111,7	74,8	121,7	77,3	120
109,2	64,8	120,4	73,2	180
109,5	61,4	119,5	63,7	240
108,7	65,9	118,7	70,9	300
110,4	71,6	124,9	72,7	360
110,3	78,9	123,6	74,3	420
110,1	82,1	121,2	77,4	480
109,7	83,4	119,7	82,8	540
110,5	84,5	119,9	86,5	600

Для проведення дослідів було приготовано необхідну кількість пасти діоксиду титану  $TiO_2$ . Задане значення початкового вологовмісту пастивизначалося шляхом зважування зразків пасти до і після їх висушування в сушильній шафі при температурі 100 °C. Початковий вологовміст склав  $U_0 = 0,818 \frac{K\%_g}{K\%_{a.c.m.}}$ . Кінцевий вологовміст матеріалу склав  $U_0 = 0,0132 \frac{K\%_g}{K\%_{a.c.m.}}$ . Термопарами замірялась температура сушильного агенту на вході в сушильну камеру та на виході із фонтануючого шару. Також за допомогою п'єзометра замірявся перепад гідравлічного опору  $\Delta P$  фонтануючого шару.

### 3.9.1 Дослідження зміни вологовмісту в пасті діоксиду титану під час сушіння

На основі експериментальних даних, наведених в таблицях 3.1 та 3.2 побудовані графічні залежності зміни вологовмісту і температури в часі при сушінні пасти діоксиду титану.

На рисунку 3.17 зображено графіки залежності зміни вологовмісту пасти діоксиду титану від часу сушіння.

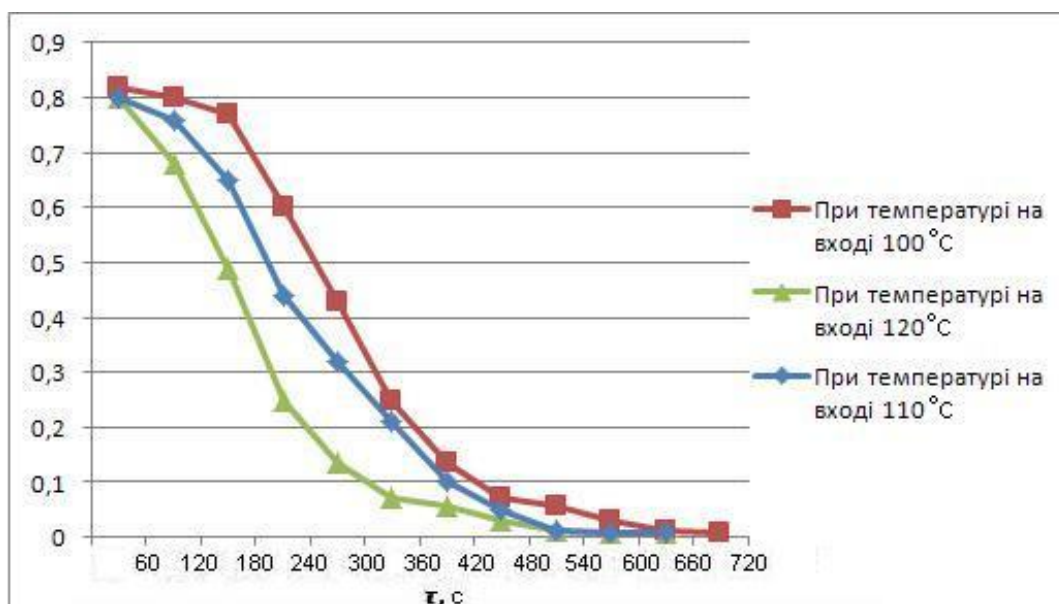


Рисунок 3.17 – Залежності вологовмісту пасти діоксиду титану від часу сушіння

На приведених кривих можна виділити три ділянки: ділянку прогріву, ділянку з постійною швидкістю сушіння та ділянку зі спадаючою швидкістю сушіння. На ділянці нагрівання швидкість сушіння поступово збільшується, в періоді постійної швидкості сушіння швидкість стала (прямий відрізок), а на ділянці зі спадаючою швидкістю кут нахилу дотичної зменшується і швидкість сушіння зменшується, крива йде паралельно до осі абсцис.

Аналізуючи залежність вологовмісту від часу сушіння можна зробити наступні висновки:

- період нагрівання пасти діоксиду титану при сушінні в фонтануючому шарі інертних тіл, значно коротший, ніж відповідний період при

кондуктивному методі сушіння за однакових теплових потоків і залежить від вологовмісту пасти і величини теплового потоку від сушильного агенту;

- зі збільшенням вологовмісту збільшується час нагрівання та зменшується швидкість процесу;
- із збільшенням теплового потоку збільшується швидкість сушіння, особливо на ділянці із постійною швидкістю сушіння.

### 3.9.2 Дослідження залежності температури пасти діоксиду титану" від часу сушіння

На рисунку 3.18 зображено графіки залежності температури пасти діоксиду титану від часу сушіння, зняті при наступних температурах сушильного агенту на вході в сушильну камеру: 100 °С, 110 °С, 120 °С.

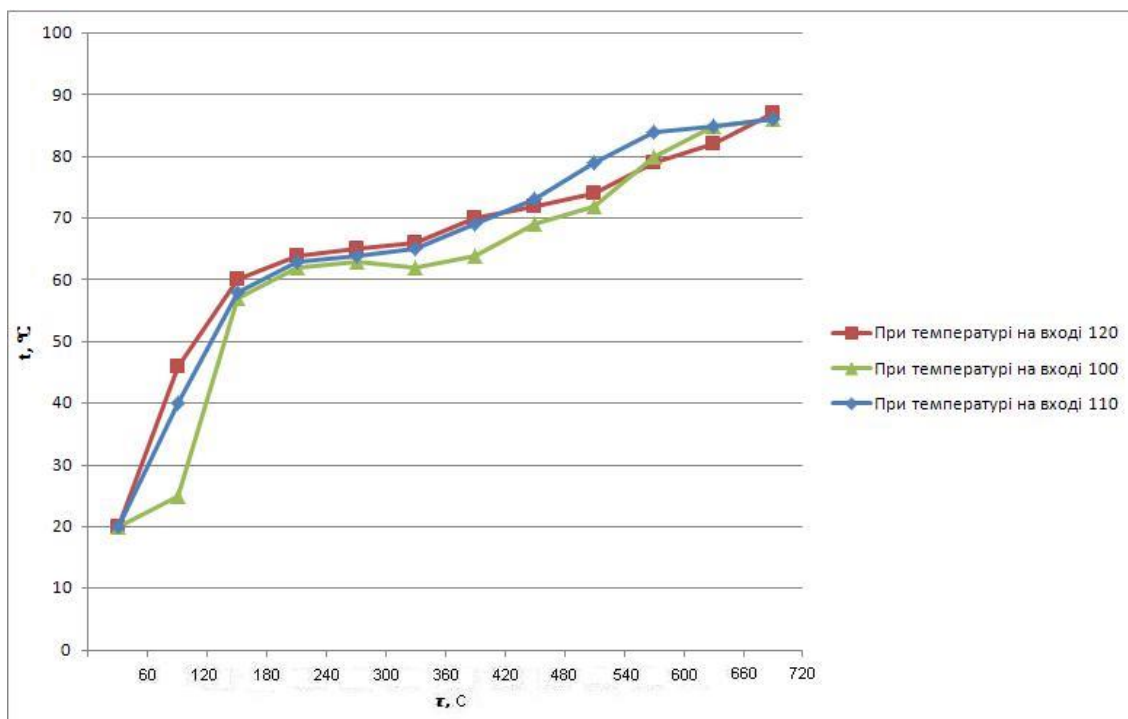


Рисунок 3.18 – Залежності температури пасти діоксиду титану від часу сушіння

Видно, що процес нагріву здійснюється з досить великою швидкістю в результаті інтенсивного вводу енергії в об'єм фонтануючого шару. При досягненні температури більше 60 °С швидкість процесу нагрівання пасти діоксиду титану є сталою, оскільки все тепло, що підводиться йде на випаровування води. З переходом процесу в дифузійну область в результаті малої концентрації вологи температура поверхні плівки продукту поступово збільшується до величини рівноважної.

Аналізуючи залежності температури поверхні плівки діоксиду титану від часу сушіння можна дійти таких висновків:

- в першому періоді сушіння температура пасти діоксиду титану є постійною.
- зі збільшенням теплового потоку зменшується час першого періоду.

Це вказує на те, що в першому періоді швидкість процесу лімітується швидкістю підводу тепла.

По даним таблиці 3.2 побудований графік залежності напруження фонтануючого шару по висушеній волозі від перепаду температур на шарі, що зображений на рисунку 3.19.

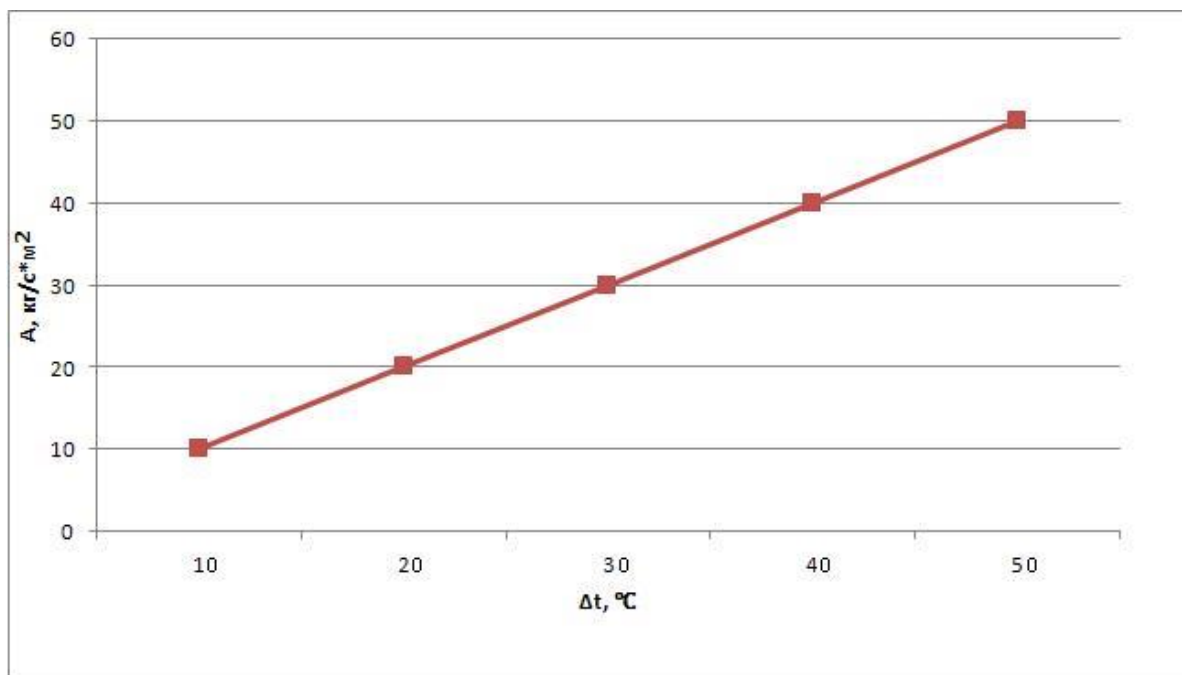


Рисунок 3.19 – Залежність напруження шару по висушеній волозі від перепаду температур на шарі



### 3.10 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі процесу сушіння тонкодисперсної пасти та досушування порошку $\text{TiO}_2$

Для перевірки адекватності математичної моделі побудуємо графік залежності експериментальних та теоретичних значень вологовмісту, що змінюються в часі. Порівняння експериментальних та теоретичних значень вологовмісту та температури, що залежать від часу сушіння зображено на рисунках 3.20 та 3.21.

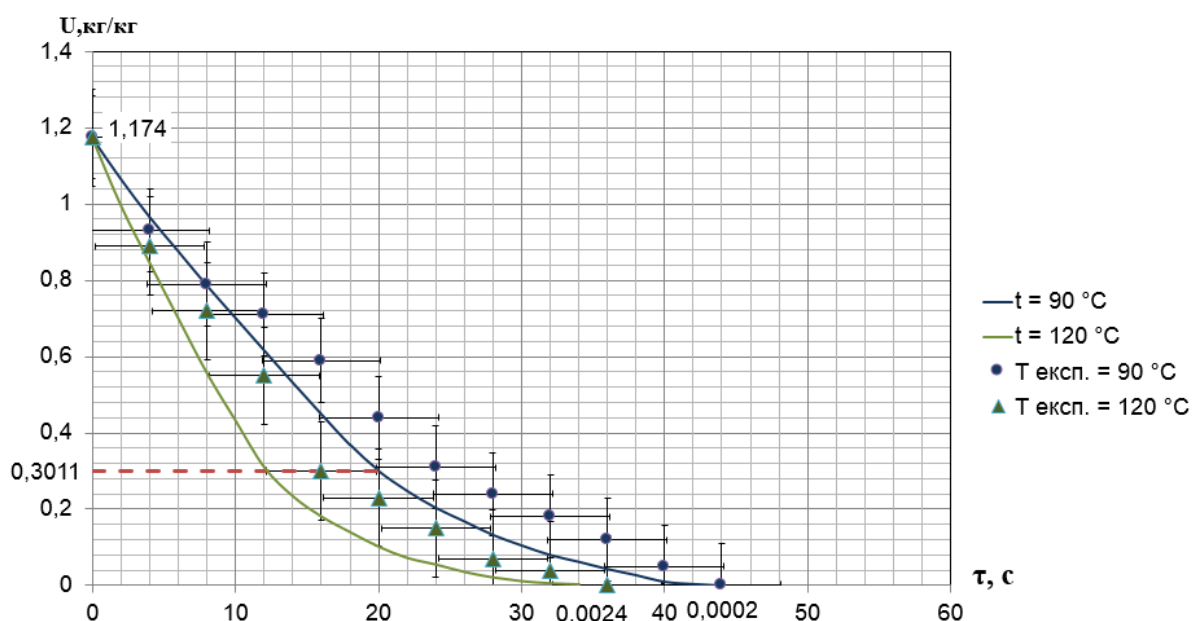


Рисунок 3.20 – Порівняння експериментальних та теоретичних значень вологовмісту, що залежить від часу сушіння

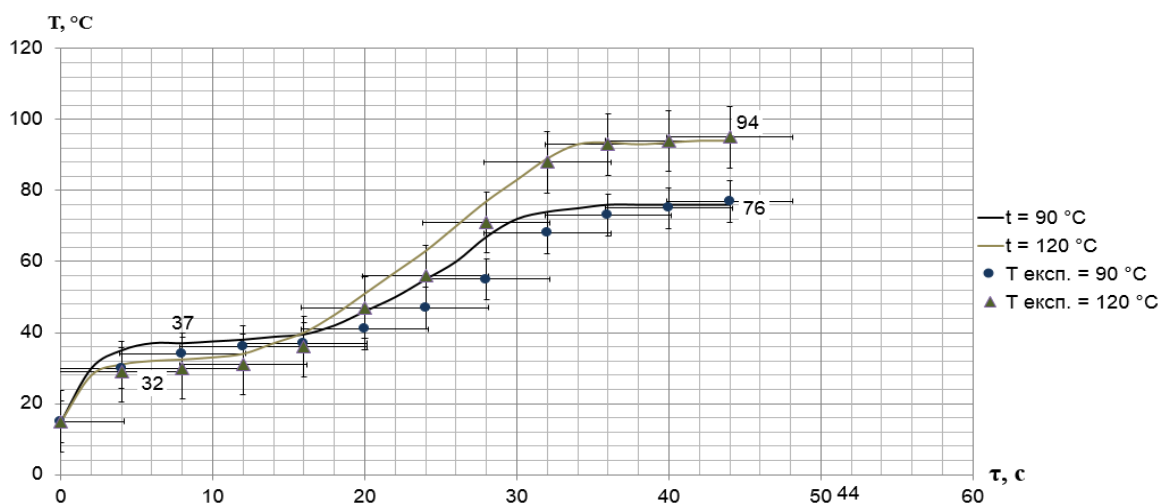


Рисунок 3.21 –Порівняння експериментальних та теоретичних значень температури, що залежить від часу сушіння

Середньоквадратичне відхилення розраховується за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{p(i)} - y_{досл(i)})^2}{N-1}} \quad (3.22)$$

Порівняння експериментальних та теоретичних значень вологовмісту та температури наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Розрахунок середньоквадратичного відхилення для значень вологовмісту та температури

Вологовміст (Т)	Вологовміст (Д)	$y_{p(i)} - y_{досл(i)}$	$(y_{p(i)} - y_{досл(i)})^2$	Температура (Т)	Температура (Д)	$y_{p(i)} - y_{досл(i)}$	$(y_{p(i)} - y_{досл(i)})^2$
0,818	0,818	0	0	20,05	20	0,05	0,0025
0,78	0,81	-0,03	0,0009	30,4	30	0,4	0,16
0,73	0,77	-0,04	0,016	40,7	40	0,7	0,49
0,65	0,61	0,04	0,016	51,6	50	1,6	2,56
0,445	0,43	0,015	0,000225	65,5	63,13	2,37	5,61
0,321	0,25	0,071	0,005	65,7	63,13	2,57	6,6
0,157	0,134	0,023	0,00053	65,8	63,13	2,67	7,12
0,084	0,072	0,013	0,000169	69,78	71	-0,22	0,0484
0,041	0,056	-0,015	0,000225	73,32	74,5	-1,18	1,39
0,028	0,032	-0,004	0,000016	77,61	79,9	-2,29	5,24
0,012	0,0132	-0,0012	0,00000144	82,4	81,7	0,7	0,49
0,006	0,009	-0,003	0,000009	85,6	83,5	2,1	4,41

За рівнянням 3.1 розраховуємо середнє квадратичне відхилення значень вологовмісту та температури, що залежать від часу сушіння:

$$\sigma_{\text{вологовмісту}} = 0,0314 \frac{K\%}{K\%_{a.c.m.}},$$

$$\sigma_{\text{температури}} = 1,978 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Математична модель сушіння наповнювача паперового полотна адекватна експериментальним даним. Середньоквадратична похибка складає по вологовмісту  $\sigma_{\text{вологовмісту}} = 0,03146426544 \frac{\text{кг}_6}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$  та по температурі  $\sigma_{\text{температури}} = 1,97888857695^\circ\text{C}$ .

### Висновки до розділу 3

За результатами проведення експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

- 1) розроблено методику проведення досліджень процесу сушіння пасти діоксиду титану;
- 2) виконано експериментальні дослідження процесу та отримані дослідні дані;
- 3) проведено аналіз та розрахунок дослідних даних;
- 4) по отриманим даним побудовано графічні залежності вологовмісту та температури пасти діоксиду титану від часу сушіння, а також залежність зміни напруження шару інертних тіл по висушеній волозі від перепаду температур на шарі;
- 5) проведено наукове обговорення отриманих графічних залежностей.
- 6) експериментальні дослідження процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану в оригінальному сушильному апараті вихрового типу дозволяють отримати основні параметри: температуру вихрового шару в зоні диспергування агломератів пасти; відношення температури осьового потоку теплоносія із нижньої частини сушильної камери і тангенціального – із верхньої частини камери, що визначає кінцеву сухість продукту; відношення швидкостей осьового потоку теплоносія із нижньої частини камери і тангенційного – із верхньої, що визначає дисперсний склад продукту.

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИХРОВИХ ПОТОКІВ ТЕПЛОНОСІЯ**

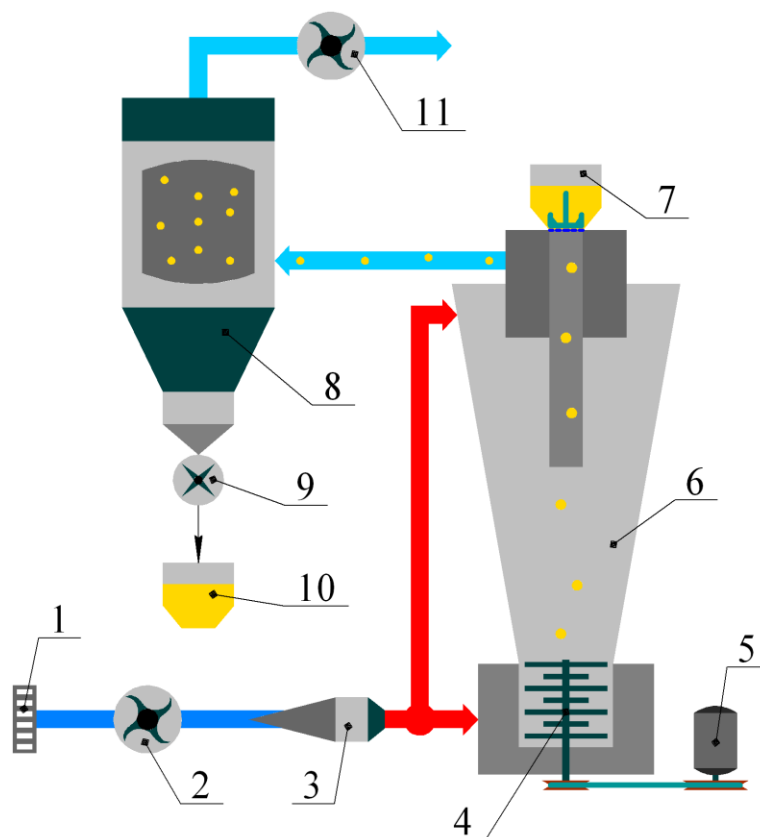
### **4.1 Алгоритм розрахунку сушильної установки із вихровим потоком теплоносія**

За результатами проведених досліджень було встановлено, що основна кількість вологи (до 90%) в пасті  $\text{TiO}_2$  висушується в зоні диспергування, при експоненціальному збільшенні поверхні продукту. Агломерати пасту із початковим еквівалентним діаметром 3 мм зневоднюються в режимі псевдозрідження, а тонкодисперсні частинки, із еквівалентним діаметром 35 мкм, піддаються видаленню залишкової вологи (приблизно 10%) в зоні досушування в режимі пневмотранспорту. Математичні моделі процесів сушіння і досушування пасту діоксиду титану, що представлені в 2 розділі даної роботи, дозволяють визначити час сушіння агломератів пасту і час досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану із задовільною точністю. Експериментальні дослідження кінетики сушіння пасту  $\text{TiO}_2$  дозволили визначити час перебування частинок продукту в режимі псевдозрідження і пневмотранспорту, який становить 3-4 с. Враховуючи допустимі розбіжності сумарного розрахункового і експериментального часу сушіння пасту діоксиду титану був розроблений алгоритм інженерної методики розрахунку вихрового сушильного апарату, що поєднує в собі організований вихровими потоками теплоносія пневмотранспорт і псевдозріджений шар.

Методика розрахунку характеристик вихрових сушильних апаратів може бути застосована для пастоподібних продуктів, подібних за техніко-фізичними параметрами із тонкодисперсною пастою діоксиду титану. Подібність параметрів визначається формою зв'язку вологи з продуктом,

формою кривої кінетики сушіння при температурі мокрого термометра, схильністю до агломерації і високим ступенем полідисперсності.

Схема вихрової сушильної установки зображена на рис. 4.1.



1 – повітряний фільтр; 2 – нагнітаючий вентилятор; 3 – газовий пальник; 4 – диспергатор; 5 – привід диспергатора; 6 – сушильний апарат; 7 – живильник-дозатор; 8 – рукавний фільтр; 9 – вивантажувальний клапан; 10 – бункер; 11 – витяжний фільтр

Рисунок 4.1 – Схема вихрової сушильної установки

Метою даного розрахунку є визначення необхідних розмірів і основних параметрів вихрової сушильної установки для сушіння тонкодисперсної пасту діоксиду титану густиною  $\rho = 2350 \text{ кг/м}^3$ .

Вихідні дані для розрахунку: продуктивність сушильного апарату по випареній волозі,  $G_{H_2O}$ , кг/год.; початкова вологість пасту,  $w_n$ , %; кінцева вологість порошку  $TiO_2$ ,  $w_k$ , %; температура теплоносія на вході в апарат,  $t_n$ , °C; температура теплоносія на виході із сушильного апарату,  $t_k$ , °C; початковий еквівалентний діаметр агломератів пасту, що потрапляють в зону

диспергування,  $d_{екв}$ , м. Всі теплові і фізичні довідкові величини для порошку діоксиду титану та води наведено в додатку Б.

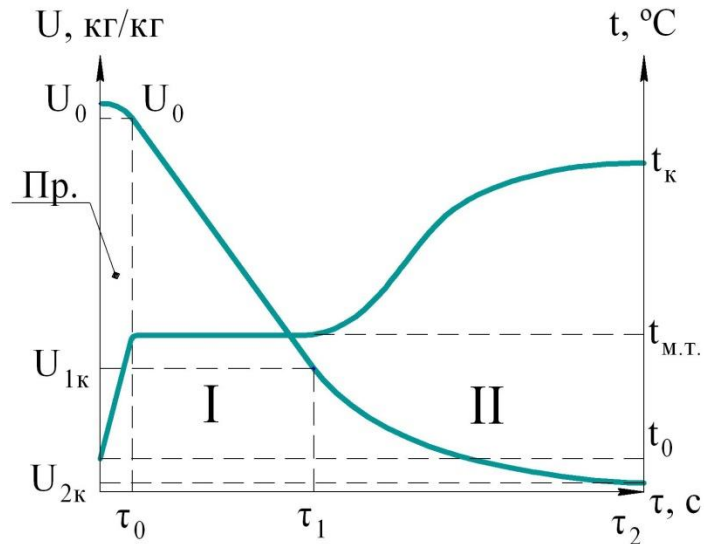
На основі розробленої математичної моделі (розділ 2) складено алгоритм розрахунку промислової установки сушіння пасти  $TiO_2$  із застосуванням вихрових потоків теплоносія (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Блок-схема до розрахунку промислової сушильної установки

Згідно алгоритму можна визначити: час сушіння пасти  $TiO_2$  до заданого кінцевого вологовмісту, геометричні розміри сушильної камери, гідравлічний опір установки, витрату природного газу в пальнику та основні параметри рукавного фільтру. Програма і повноцінна блок-схема розрахунку та таблиця ідентифікаторів наведені в додатку Б. Класична крива сушіння

пастоподібних продуктів, що містить 3 періоди сушіння зображена на рисунку 4.3 [54]. Вологовміст продукту після періоду прогрівання  $U_1$ , перший критичний вологовміст  $U_{1к}$ , час сушіння протягом періоду прогрівання  $\tau_0$ , першого періоду  $\tau_1$  та другого періоду  $\tau_2$  знайдені за результатами розрахунку математичної моделі сушіння та досушування пасти  $TiO_2$ .



Пр. – період прогріву продукту; I – період сушіння із постійною швидкістю сушіння; II – період досушування продукту

Рисунок 4.3 – Крива сушіння

Після початку роботи програми за алгоритмом (блок 1) в блоці 2 згідно рисунку 4.2 задаються вихідні дані, що наведені вище. Також в залежності від мети розрахунку задається або кінцевий вологовміст продукту, або конструктивно і технологічно допустимий час перебування пасти діоксиду титану в сушильній камері.

В блоці 3 розраховуються матеріальний (4.1) і тепловий (4.2) баланси:

$$G_n = G_{TiO_2} + G_{H_2O}, \quad (4.1)$$

$$Q_{np.} = Q_{заг.} + Q_{вип.}, \quad Q_{вип.} = Q_1 + Q_2, \quad (4.2)$$

де  $G_n$  – продуктивність по пасті  $TiO_2$ , кг/с;  $G_{TiO_2}$  – продуктивність по абсолютно сухому продукту  $TiO_2$ , кг  $TiO_2$ /с;  $Q_{np.}$  – тепловий потік, який затрачається на прогрівання продукту до температури мокрого термометра,

кВт;  $Q_{заг.}$  – загальний тепловий потік від теплоносія, кВт;  $Q_{вип.}$  – загальний тепловий потік, що витрачається на випаровування води, кВт;  $Q_1$  – тепловий потік на висушування пасти діоксиду титану до  $U_{1к}$ , кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.п.</sub>, кВт;  $Q_2$  – тепловий потік на висушування продукту до кінцевої залишкової вологості, кВт.

Початковий  $U_0$ , кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.п.</sub> і кінцевий  $U_{2к}$ , кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.п.</sub> вологовмісти продукту:

$$U_0 = \frac{w_n}{100 - w_n}, \quad U_{2к} = \frac{w_k}{100 - w_k} \quad (4.3)$$

Продуктивність сушильної установки по сухому продукту  $TiO_2$ :

$$G_{TiO_2} = \frac{G_{H_2O}}{U_0} \quad (4.4)$$

Відповідно продуктивність по пасті діоксиду титану:

$$G_n = \frac{G_{H_2O} \cdot 100}{w_n} \quad (4.5)$$

Визначаємо вологовміст теплоносія на вході  $x_0, \frac{кг_в}{кг_{сух.пов}}$  і виході  $x_2, \frac{кг_в}{кг_{сух.пов}}$  із сушильного апарату за допомогою I-d діаграми вологого повітря при заданих початковій температурі теплоносія до газового пальника  $t'_0, ^\circ C$  і відносній вологості  $\varphi_0, \%$ .

Температура мокрого термометра в зоні диспергування  $t_{м.т.}$ ,  $^\circ C$  визначається за допомогою I-d діаграми вологого повітря при заданій температурі теплоносія на вході в сушильний апарат.

Питомі витрати теплоносія, кг<sub>п</sub>/кг<sub>в</sub>:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (4.8)$$

Теплові потоки на прогрівання  $Q_{пр.}$  та випаровування води становлять:

$$Q_{пр.} = \frac{G_{TiO_2}}{\psi \cdot 3600} \cdot [(c_{TiO_2} + U_0 \cdot c_{H_2O}) \cdot (t_{м.т.} - t_0) + (U_0 - U_1) \cdot r], \quad (4.9)$$

$$Q_1 = \frac{G_{TiO_2}}{\psi \cdot 3600} \cdot (U_1 - U_{1к}) \cdot r, \quad (4.10)$$

$$Q_2 = \frac{G_{TiO_2}}{\psi \cdot 3600} \cdot [(c_{TiO_2} + U_{2к} \cdot c_{H_2O}) \cdot (t_k - t_{м.т.}) + (U_{1к} - U_{2к}) \cdot r], \quad (4.11)$$



де  $\psi = 0,9$  – коефіцієнт втрат теплового потоку;  $c_{TiO_2}, c_{H_2O}$  – питомі теплоємності порошку діоксиду титану та води відповідно;  $t_k$  – кінцева температура порошку  $TiO_2$ , °C;  $t_0$  – початкова температура пасти, °C;  $U_1$  – вологовміст пасти продукту після періоду прогрівання, кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.п.</sub>;  $U_{2к}$  – кінцевий вологовміст продукту, кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.п.</sub>.

Загальні витрати теплоносія, кг<sub>п</sub>/с:

$$L_{заг.} = L_1 + L_2, \quad (4.12)$$

$$L_1 = \frac{Q_{np.} + Q_1}{c_{нов.} \cdot (t_n - t_1)}, \quad L_2 = \frac{Q_2}{c_{нов.} \cdot (t_1 - t_k)} \quad (4.13)$$

де  $L_1$  – витрати теплоносія на нагрівання і сушіння продукту в першому періоді сушіння, кг<sub>п</sub>/с;  $L_2$  – витрати теплоносія на досушування в другому періоді, кг<sub>п</sub>/с;  $c_{нов.}$  – питома теплоємність повітря,  $\frac{кДж}{кг \cdot K}$ ;  $t_1$  – температура теплоносія на виході із зони диспергування, °C.

Співвідношення витрат теплоносія в зону диспергування і досушування становить:

$$Z = \frac{L_1}{L_2} \quad (4.14)$$

Перевірочна температура теплоносія на вході в сушильний апарат:

$$t_n = \frac{Q_{np.} + Q_1 + Q_2}{L_{заг.} \cdot c_{нов.}} + t_0', \quad (4.15)$$

Витрати теплоти на нагрівання теплоносія, кВт:

$$Q_3 = L_{заг.} \cdot c_{нов.} \cdot (t_n - t_0') \quad (4.16)$$

В блоці 4 за умови застосування вихрових потоків теплоносія визначаються поля критичної швидкості виносу продукту та швидкості витання агломератів і тонкодисперсних частинок  $TiO_2$ . Число Архімеда знаходимо за формулою [53]:

$$Ar = g \cdot d_{екв}^3 \cdot \frac{\rho_{пасту} - \rho_m}{\rho_m \cdot \nu_m^2}, \quad (4.17)$$

де  $\rho_{пасту} = 2486$  кг<sub>пасту</sub>/м<sup>3</sup> – густина пасти  $TiO_2$ ;  $\rho_m = 0,5$  кг<sub>т</sub>/м<sup>3</sup> – густина теплоносія при  $t_{cp} = 400^\circ\text{C}$ ;  $\nu_m = 3,009 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$  – кінематична в'язкість теплоносія при  $t_{cp} = 400^\circ\text{C}$ .

Критерій Рейнольдса для умови початку псевдозрідження твердих частинок в вихровому потоці теплоносія -  $Re_{кр}$  [7]:

$$Re_{кр} = 0,004 \cdot \rho \cdot \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} \quad (4.18)$$

Критерії Нусельта та Рейнольдса для робочого режиму:

$$Re_p = \frac{Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}} \quad (4.19)$$

$$Nu = 2 + 0,16 \cdot Re^{0,667} \quad (4.20)$$

де  $\varepsilon_0$  - порозність шару.

Відповідно середня швидкість теплоносія для псевдозрідження  $w_{кр}$  і витання  $w_{вит}$ , м/с:

$$w_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot v_m}{d_{екв}}, \quad w_{вит} = \frac{Re_p \cdot v_m}{d_{екв}} \quad (4.21)$$

Середня швидкість теплоносія приймається по співвідношенню:

$$w = (2 \dots 3) \cdot w_{вит} \quad (4.22)$$

В блоках 5-8 відбувається цикл розрахунку визначення часу сушіння, температури, вологовмісту та поверхні сушіння продукту  $TiO_2$ . Блок 5 – початок циклу. В блоці 6 алгоритму поточне значення вологовмісту, температури та поверхні висушування діоксиду титану визначаються за розробленими математичними описанням процесів сушіння та досушування продукту  $TiO_2$  у вихрових потоках теплоносія із застосуванням безперервного диспергування агломератів пасти (розділ 2). В блоці 7 виконується порівняння поточного значення вологовмісту з кінцевим, що є умовою виходу з циклу.

Теоретичне значення часу сушіння пасти діоксиду титану  $\tau$  дорівнює часу перебування продукту в сушильній камері  $\tau_{перебув.}$ , с:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 = \tau_{перебув.}, \quad (4.23)$$

де  $\tau_1$  – теоретичний час нагрівання продукту, с;  $\tau_2$  – теоретичний час сушіння продукту до першого критичного вологовмісту, с;  $\tau_2$  – теоретичний час досушування продукту, с.

Враховуючи рівність 4.16 в блоках 9 та 10 визначається об'єм  $V_{кам.}$  сушильної камери (рис. 4.4):

$$V_{кам.} = \tau_{перев.} \cdot L_{заг.} \quad (4.24)$$

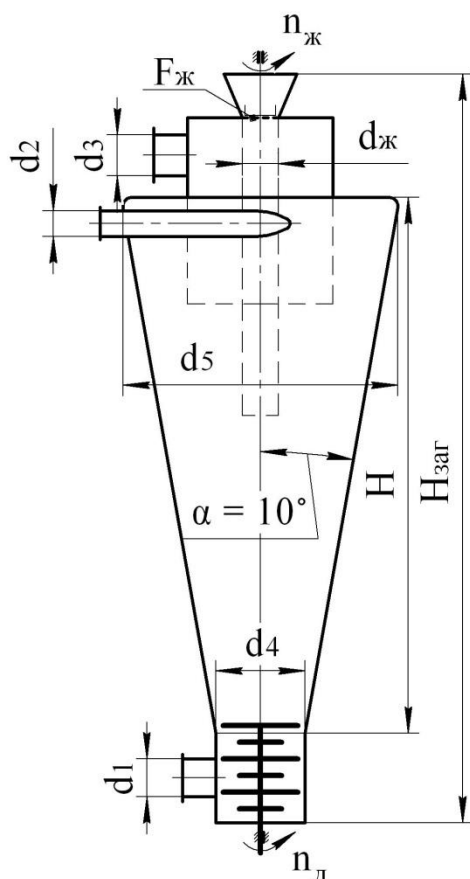


Рисунок 4.4 – Схема геометричних розмірів сушильного апарату.

Діаметри патрубків  $d_1$ ,  $d_2$  і  $d_3$  визначаються:

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot L_i}{\pi \cdot w_i}}, \quad (4.25)$$

де  $w_i = 20 \dots 25$  м/с – швидкість теплоносія в патрубках. Діаметр  $d_{жс}$  і площа живого перетину  $F_{жс}$  живильника визначаються враховуючи продуктивність установки по пастоподібному продукту:

$$F_{жс} = \frac{G_n}{\rho \cdot w_n}, \quad (4.26)$$

де  $w_n = 0,2 \dots 1$  м/с – швидкість подачі пасти, м/с. Діаметр диспергатора  $d_4$  визначається на

основі діаметру вхідного патрубка  $d_1$  у співвідношенні  $d_4 = (1,5 \dots 1,8) \cdot d_1$ .

Кут конусності  $\alpha$  сушильної камери визначений із умов сепарування тонкодисперсних частинок продукту (див. розділ 2) і становить  $10^\circ$ .

Висота сушильної камери розраховується наступним чином:

$$H = \frac{d_4}{\tan \alpha \cdot j}, \quad (4.27)$$

де  $j = 0,85$  – коефіцієнт конструкції вихрового сушильного апарату.

Загальна розрахункова висота сушильного апарату:

$$H_{заг.} = (3,2 \dots 3,5) \cdot H \quad (4.28)$$

У блоці 11 алгоритму розрахунку знаходимо загальний гідравлічний опір установки на перекачування теплоносія, кПа:

$$\Delta P_{заг.} = \Delta P_{пальн.} + \Delta P_{с.а.} + \Delta P_{р.ф.} + \Delta P_l, \quad (4.29)$$

де  $\Delta P_{пальн.}$ ,  $\Delta P_{с.а.}$ ,  $\Delta P_{р.ф.}$ ,  $\Delta P_l$  – відповідно гідравлічні опори пальника, сушильного апарату, рукавного фільтру та втрати напору по довжині трубопроводів.

Гідравлічний опір сушильного апарату складається із, кПа:

$$\Delta P_{с.а.} = \Delta P_{\partial.} + \Delta P_{зав.} + \Delta P_l = \sum_{i=1}^n \xi_{с.а.i} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho_m}{2}, \quad (4.30)$$

де  $\sum_{i=1}^n \xi_{с.а.i}$  – сумарний коефіцієнт опору апарату, знайдений експериментальним шляхом у розділі 3.

Відповідно потужність на транспортування теплоносія буде, кВт:

$$N_{вент.} = \Delta P_{зав.} \cdot L_{зав.} \quad (4.31)$$

## 4.2 Розрахунок допоміжного обладнання вихрової сушильної установки

Система завантаження вологого продукту повинна забезпечувати безперервну його подачу із заданою продуктивністю, без підпресування і виключення можливості підсосу повітря. Бункер живильника обладнується датчиком рівня. В результаті проведених досліджень запропоновано для подачі тонкодисперсної пасти діоксиду титану, яка при механічному впливі набуває властивостей тиксотропності, використовувати протираючі живильники-дозатори (рисунок 4.5), що розташовуються у верхній частині сушильної камери, а паста продукту через направляючу трубу під силою тяжіння потрапляє в зону диспергування. В 12 блоці алгоритму розрахунку сушильної установки розраховано продуктивність живильника  $G_{жс}$ , кг пасти/с:

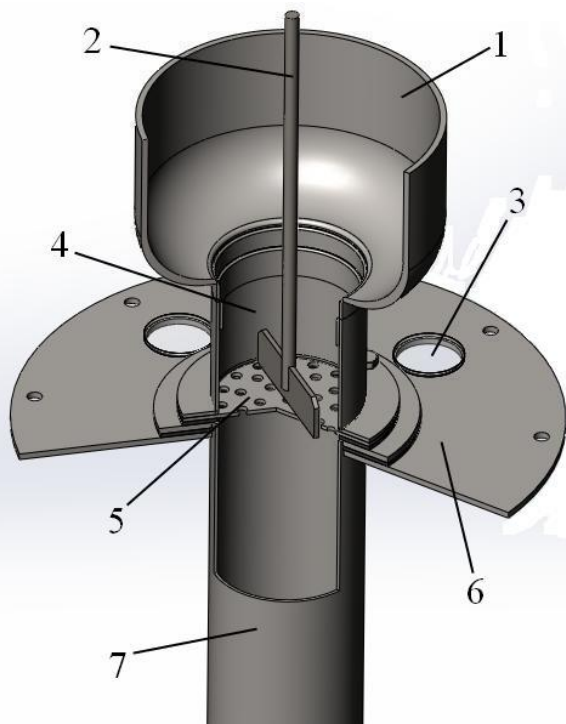
$$G_{жс} = F_{жс.п.} \cdot w_n, \quad (4.23)$$

де  $F_{жс.п.}$  - площа живого перетину перфорованої решітки, м<sup>2</sup>;  $w_n$  – швидкість подачі пасти, м/с.

Швидкість подачі пасти залежить від кількості обертів та геометричних розмірів лопаті:

$$w_n = \frac{\pi \cdot r_{л.} \cdot n}{8 \cdot 60}, \quad (4.24)$$

де  $r_n$  – радіус лопаті, м;  $n$  – кількість обертів лопаті,  $\text{хв}^{-1}$ .



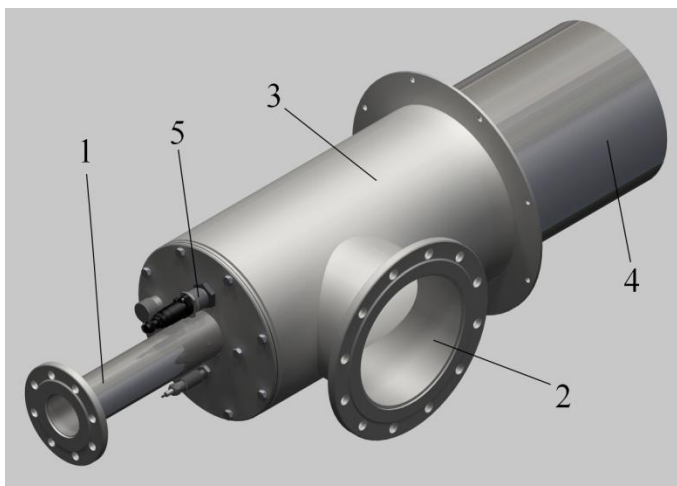
1 – завантажувальний бункер; 2 – вал із лопатею, що з'єднаний з приводом;  
3 – оглядове вікно; 4 – стакан;  
5 – перфорована решітка; 6 – верхня кришка сушильного апарату;  
7 – направляюча труба

Рисунок 4.5 – Конструкція живильника-дозатора пасти протираючого типу.

Діаметр стакана рекомендується вибирати в межах 80-120 мм. Установча потужність приводу і частота обертання валу із лопатею визначаються за

відомими методиками [49]. Привод обладнаний системою автоматичного відключення подачі продукту при аварійному припиненні подачі теплоносія в сушильну камеру та трансформатором для можливості регулювання кількості обертів лопаті. Перфорована решітка може містити отвори діаметром від 3 до 5 мм.

Для нагріву теплоносія використовуються газові пальники (рис. 4.6), що комплектуються електродами для запалювання повітряно-газової суміші, ультрафіолетовими датчиками та оглядовим патрубком із склом. Температурний режим забезпечується зміною подачі газу і повітря.



1 – патрубок для подачі газу;  
2 – патрубок для подачі повітря;  
3 – камера змішування; 4 – сопло;  
5 – електрод запалювання суміші  
Рисунок 4.6 – Конструкція газового пальника.

Даний пальник монтується на

фланець підводу повітря, а відкрита поверхня пальника обов'язково футерується м'якими теплоізоляційними матеріалами – фетром або волоком МКРВЦ.

В блоці 13 алгоритму розрахунку сушильної установки розраховано номінальну кількість газу  $G_z$ , кг/с для забезпечення необхідних витрат теплоносія  $L$  при його початковій температурі 650°C:

$$G_z = \frac{Q_{zag}}{Q_n^c \cdot \eta}, \quad (4.25)$$

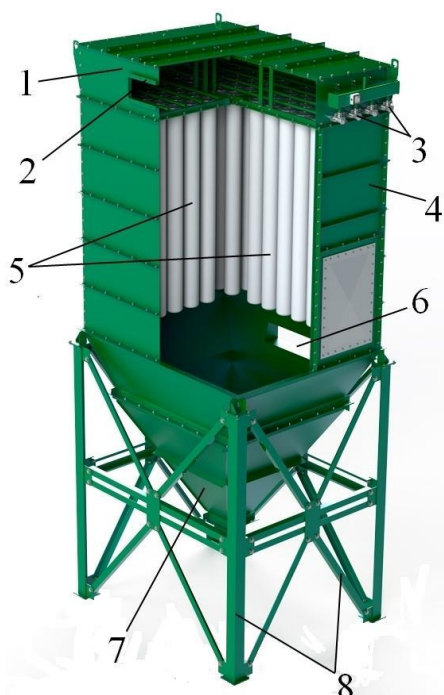
де  $Q_{zag}$  - номінальна теплова потужність сушильної установки, кВт;  
 $Q_n^c$  – теплота горіння газу, кДж/кг;  $\eta$  – ККД пальника.

Відповідно витрати повітря на процес горіння визначаються, м<sup>3</sup>/с:

$$L_n = \frac{\alpha_n \cdot G_z \cdot L_n^0}{\rho_z}, \quad (4.26)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт надлишку повітря, що подається в топкову камеру, приймаємо для газу  $\alpha_n = 1,05$ ;  $L_n^0$  - витрати повітря, що необхідні для горіння 1 м<sup>3</sup> газу,  $\frac{m^3}{m^3}$ ;  $\rho_z$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>.

Невід'ємною частиною сушильної установки являється обладнання для пилеочищення. Тонкодисперсні частинки продукту TiO<sub>2</sub> відділяємо від теплоносія за допомогою рукавного фільтру. Ефективність очищення має становити 99,99%, тобто вміст частинок TiO<sub>2</sub> на виході має становити менше



10 мг/м<sup>3</sup>. Запропоновано секційний рукавний фільтр (рисунок 4.7) із пневматичними сприсками 3 для очищення фільтрувальної поверхні.

1 – колектор; 2 – вихідний патрубок;  
 3 – система пневматичних сприсків;  
 4 – корпус; 5 – рукави; 6 – вхідний патрубок;  
 7 – вивантажувальний бункер; 8 – опори

Рисунок 4.7 – Конструкція секційного рукавного фільтру.

У блоці 14 алгоритму розрахунку сушильної установки отримуються основні параметри рукавного фільтра до яких належать:

Загальна поверхня фільтрації:

$$F_{\phi} = \frac{L_m^3 + L_{\phi}}{q} + F_p, \quad (4.27)$$

де  $L_m^3$  – об'єм запиленого теплоносія, що подається на очищення,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $L_{\phi}$  – кількість повітря, що витрачається на зворотне продування,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $q$  – питоме повітряне навантаження при фільтруванні,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $F_p = \frac{n_c \cdot F_c \cdot \tau_p \cdot m_p}{3600}$  – фільтрувальна поверхня, що відключається на стадії регенерації протягом 1 години,  $\text{м}^2$ , де  $n_c$  – кількість секцій;  $F_c$  – фільтрувальна поверхня секції,  $\text{м}^2$ ;  $\tau_p$  – час відключення секції на регенерацію,  $\text{с}$ ;  $m_p$  – число регенерацій протягом години.

Питоме повітряне навантаження:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5, \quad (4.28)$$

де  $q_n$  – нормативне питоме навантаження, що залежить від типу пилу та його здатності до агломерації, для порошку  $\text{TiO}_2$   $q_n = 1,7 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{хв}}$ ;  $C_1 = 0,7 \dots 0,85$  – коефіцієнт, що враховує особливості регенерації фільтрувальних елементів із використанням зворотного продування;  $C_2 = 0,8 \dots 0,9$  – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації пилу на питоме повітряне навантаження;  $C_3 = 1$  – коефіцієнт, що враховує вплив дисперсності пилу діоксиду титану в теплоносії;  $C_4 = 0,7$  коефіцієнт, що враховує вплив температури теплоносія, що очищається ( $t = 150^\circ\text{C}$ );  $C_5 = 1$  – коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення продукту  $\text{TiO}_2$ .

Загальний гідравлічний опір секційного рукавного пиловловлювача складається із опору корпусу  $\Delta P_k$  фільтрувального апарату та сумарного опору рукавів  $\Delta P_p$ ,  $\text{кПа}$ :

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_k + \Delta P_p \quad (4.29)$$

Опір корпусу пиловловлювача визначається величиною місцевих опорів, що виникають на вході і виході з апарату і при розподілі потоку запиленого теплоносія по фільтрувальних елементах, кПа:

$$\Delta P_{\phi} = \sqrt{\xi_{\kappa} \cdot w_{\phi x}^2 \cdot \rho_m}, \quad (4.30)$$

де  $\xi_{\kappa}$  - сумарний коефіцієнт місцевих опорів корпусу фільтру;  $w_{\phi x}$  - швидкість запиленого теплоносія на вході в апарат, м/с.

Гідравлічний опір рукавів значною мірою залежить від маси та властивостей пилу, який осів на тканинну перегородку. Цей опір має дві складові постійну  $\Delta P'$  і змінну  $\Delta P''$  величини, кПа:

$$\Delta P_p = \Delta P' + \Delta P'' \quad (4.31)$$

Постійна складова гідравлічного опору створюється фільтрувальною перегородкою та пилом, що осів на ній, кПа:

$$\Delta P' = k_n \cdot \mu_a \cdot w_{\phi x}^n, \quad (4.32)$$

де  $k_n$  - коефіцієнт, що залежить від товщини фільтрувальної тканини та ступеня її проникності;  $\mu_a$  - коефіцієнт в'язкості запиленого теплоносія;  $n$  - показник ступеня, що залежить від режиму течії теплоносія, для турбулентного режиму  $n > 1$ ;  $w_{\phi x}$  - швидкість теплоносія на виході із рукавного фільтру, м/с.

Змінна складова гідравлічного опору, кПа:

$$\Delta P'' = z_n \cdot \mu_a \cdot w_{\phi x}^2 \cdot k_1 \cdot \tau, \quad (4.33)$$

де  $z_n$  - змінна величина гідравлічного опору фільтрувальної перегородки;  $k_1$  - коефіцієнт опору шару пилу на фільтрувальній тканині;  $\tau$  - тривалість циклу фільтрування, приблизно  $\tau = 600$  с.

Для подачі теплоносія  $L$ , м<sup>3</sup>/с через систему газовий пальник – сушильний апарат – рукавний фільтр – з'єднувальні трубопроводи і подолання загального гідравлічного опору всієї системи –  $\Delta P_{\text{заг.}}$ , кПа вибираємо вентилятор. Відповідно до розрахунків і експериментальним вимірам сумарний гідравлічний опір  $\Delta P_{\text{заг.}} \approx 30$  кПа. Згідно переліку характеристик основних вентиляторів найбільш доцільними для даної вихрової сушильної



установки будуть відцентрові вентилятори високого тиску № 5-8 (ВВТ). Потужність  $N_{\text{вент.}}$  і число обертів електродвигуна із врахуванням отримання максимального ККД вибираємо згідно розрахованих загальних витрат теплоносія  $L_{\text{заг.}}$ .

#### **Висновки до розділу 4**

1. На основі розробленої математичної моделі складено алгоритм розрахунку промислової сушильної установки вихрового типу для сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану. За цим алгоритмом для конкретних вихідних даних можна визначити час сушіння матеріалу та геометричні розміри сушильного апарату вихрового типу.

2. Для покращення якості вихідного продукту та зменшення енергозатрат на здійснення процесу сушіння запропоновано конусоподібну конфігурацію сушильного апарату із ножовим диспергатором та живильником протираючого типу, що захищені патентами України на корисні моделі.

3. Встановлено, що питомі затрати під час сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану із застосуванням запропонованого сушильного апарату вихрового типу менші, ніж при використанні існуючих аналогів стрічкових, розпилювальних сушарок та сушарок типу «Флеш».

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – підвищення ефективності процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому потоці теплоносія із застосуванням псевдозрідження та безперервного подрібнення матеріалу.

1. Обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання процесів сушіння і подрібнення пасти  $\text{TiO}_2$  та досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу.

2. Науково обґрунтовано фізичну і розвинено математичну моделі процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія.

3. Отримано кінетичні закономірності та основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок.

4. Теоретично визначено поля тангенційних і осьових швидкостей та тисків вихрових потоків теплоносія.

5. Експериментально визначено вплив безперервного подрібнення частинок матеріалу у псевдозрідженому шарі на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.

6. Сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія, що утворюється в розробленому сушильному апараті.

7. Встановлено найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок матеріалу до залишкової вологості 0,3 %.

8. Експериментально отримано значення коефіцієнта швидкості подрібнення агломератів пасти діоксиду титану  $K_z$  та коефіцієнтів гідравлічного опору диспергатора  $\xi_1$  і тангенційного вводу теплоносія в зону

досушування  $\xi_2$ , що дозволило розрахувати математичну модель процесу сушіння пасти діоксиду титану.

9. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$ .

10. На основі результатів експериментальних досліджень підтверджено адекватність математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану.

11. За результатами дослідження розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі, для здійснення сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в сушильному обладнанні ТОВ «Мілкіленд» і ТОВ «Лакі-Фарма», а також у навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диоксид титана. Характеристики [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://lkmprom.ru/c lauses/issledovaniya/dioksid-titana-ego-svoystva-i-vred-ot-ispolzovaniy/>.
2. Дисперсні системи. Фармацевтична енциклопедія [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/2508/dispersni-sistemi>.
3. Оксид титану [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Оксид\\_титану\(IV\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Оксид_титану(IV)).
4. Диоксид титана – свойства и область применения материала [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://www.yaregaruda.ru/ru/node/53>.
5. Цілі сталого розвитку 2016-2030 [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <http://www.un.org.ua/ua/tsili-rozvytku-tysiacholittia/tsili-staloho-rozvytku>.
6. Плановський О.М. Сушіння дисперсних матеріалів в хімічній промисловості / Плановський О.М., Муштаєв В.І., Ульянов В.М. // Москва : Хімія. – 1979. – 288 с.
7. Свиридов В.В. Не срібні фотографічні процеси / Свиридов В.В. // Л.: Хімія, 1984. – 375 с.
8. Шабанова Н.А. Хімія і технологія нанодисперсних оксидів / Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркісов П.Д. // М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 309 с.
9. Пул Ч. Нанотехнології / Пул Ч., Оуэне Ф. // М.: Техносфера, 2004. 328 с.
10. Sigimoto T., Zhou X., Maramatsu A. Synthesis of uniform anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles by gel-sol method. Solution Chemistry of Ti(OH)<sub>2</sub> complexes // J. Colloid Interface Sci. 2002. V. 252. № 2. P. 339-346.

11. Sigimoto T., Zhou X. Synthesis of uniform anatase  $\text{TiO}_2$  nanoparticles by gel-sol method. Formation process and size control // J. Colloid Interface Sci. 2003. Т. 259. № 1. С. 43-52.
12. Голикова Е.В. Электроповерхневі властивості і агрегатна стійкість водних дисперсій  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  / Голикова Е.В., Рогозова О.М., Щелкунов Д. М., Чернобережський Ю.М. // Коллоїд. журн. 1995. Т. 57. № 1. С. 25-29.
13. Pierre A.C. Introduction to Sol-Gel processing. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. 408 с.
14. Ying J. Y., Wang C.-C. Low-Temperature Crystallization of Titania Nanoparticles // 14th International Symposium on Industrial Crystallization. Warwickshire: IChemE, 1999. 230 p.
15. Clarke A. E. Investigation of factors contributing to the deposition of contaminants on dryer cylinders / A. E. Clarke. – Georgia: Georgia Institute of Technology, 2007. – P. 112.
16. Dhib R. Derivation of a control oriented low order model of the dynamics of an infrared oven for the continuous drying of a thin sheet of material/ R. Dhib, N. Theriem, A. D. Broadbent // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 76. – P. 290-299.
17. Dhib R. Infrared drying: from process modeling to advanced process control / R. Dhib // Drying Technology: An International Journal. – 2007. – Vol. 25. – № 1. – P. 97-105.
18. Dümichen E Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method/ E. Dümichen, A. K. Barthel, U. Braun et. al // Water Research. – 2015. – Vol. 85. – P. 451-457.
19. Fernandez M. L. Radiative drying model of porous materials / M. L. Fernandez, J. R. Howell // Drying Technology: An International Journal. – 1997. – Vol. 15. – № 10. – P. 2377-2399.

20. Ghodbanan S. Steady state modeling of multi-cylinder dryers in corrugating paper machine / S. Ghodbanan, R. Alizadeh, S. Shafiei // *Drying Technology: An International Journal*. – 2015. – Vol. 33. – № 12. – P. 1474-1490.
21. Heo C. H. Dynamic modeling of paper drying processes / C. H. Heo, H. Cho, Y.-K. Yeo // *Korean journal of chemical engineering*. – 2011. – Vol. 28. – № 8. – P. 1651-1657.
22. Hung D.V. Preserving the strength of corrugated cardboard under high humidity condition using nano-sized mists / D.V.Hung, Y.Nakano, F. Tanaka et. al // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70–№ 14. – P. 2123-2127.
23. Hyukjae L. Temperature uniformity in water films and wet paper through spectrally selective infrared heating / H. Lee, R. F. Speyer, T. Patterson // *Drying Technology: An International Journal*. – 2003. – Vol. 21. – № 1. – P. 35-50.
24. Karlsson M. Static and dynamic modeling of cardboard drying part 2: theoretical model / M. Karlsson, S. Stenström // *Drying Technology: An International Journal*. – 2005. – Vol. 23. – № 1-2. – P. 143-163.
25. Kuang H.-De Study of heat and mass transfer during IR drying of paper / H.-De Kuang, J. Thibault, B. P. A. Grandjean, R. Chen // *Drying Technology: An International Journal*. – 1994. – Vol. 12. – № 3. – P. 545-575.
26. Lampinen M. J. Modeling and measurements of infrared dryers for coated paper / M. J. Lampinen, K. T. Ojala, E. Koski // *Drying Technology: An International Journal*. – 1991. – Vol. 9. – № 4. – P. 973-1017.
27. Lu T. Numerical and experimental investigation of paper drying: Heat and mass transfer with phase change in porous media / T. Lu, , S. Q. Shen // *Applied Thermal Engineering Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 27. – № 8. – P. 1248-1258.
28. Marchevsky V. Kinetics of corrugated board flute drying with the use of infrared radiation / V. Marchevsky, O. Novokhat // *The Advanced Science Journal*. – Vol. 2015. – № 6. – P. 69-72.

29.       Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, O. Novokhat, O. Tsepka // Ukrainian Journal of Food Science. – Vol. 2015. — №2. – P. 310-321.
30.       Mathcad.       [Электронный ресурс].       –       Режим доступа:<http://mathcad.com.ua/>
31.       Meylan F. D.CO<sub>2</sub>utilization in the perspective of industrialecology, an overview / F. D.Meylan, V. Moreau,S. Erkman //Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. – 2015.–Vol. 12. – P. 101-108.
32.       Nilsson L. Heat and mass transfer in multicylinder drying: Part I. Analysis of machine data / L. Nilsson// Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Vol. 43. – № 12. – P. 1547-1553.
33.       Nilsson L. Heat and mass transfer in multicylinder drying: Part II. Analysis of internal and external transport resistances / L. Nilsson // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Vol. 43. – № 12. – P. 1555-1560.
34.       Pat. 687768 (EP), CI.<sup>6</sup>D 21 F 5/04. Drying sections of paper machine / Ahokas Matti (FI), Lehosvuo Risto (FI), Valmet paper machinery inc. (FI). – №95850107.4; application date 13.06.95; publication date 20.12.95.
35.       Pat. № 0655528 A2 (EPO), Int. Cl.<sup>6</sup>D21F 5/04. Methods in the drying of a paper web as well as dryer sections of a paper machine / Kerttula(FI), Yli-Kaupila (FI), Kaihovirta, (FI); applicant Valmet paper machinery inc.(FI). – 94118326.1; application date 22.11.94; publication date 31.05.95.
36.       Pat. № 4900583 (US), CI.<sup>6</sup> B05D 3/06. Method of producing cast coated paper using near-infrared radiation / Tetsuya Hirabayashi(JP), Mikio Takahashi(JP), Kanzaki Paper Mfg. Co. (JP). – 183659; application date 19.04.88; publication date 13.12.90.
37.       Pat. № 4936025(US), Int. Cl.<sup>5</sup>F26B7/00. Combination infrared and airborne drying of a web / Perttie Heikkila(FI); applicant Valmet paper machinery inc.(FI). – 343049; application date 25.04.1989; publication date 26.06.1990.

38. Pat. № 4942674(US), Int. Cl.<sup>5</sup>F26B7/00. Method in the drying of a paper web or equivalent / Marrku Karlsson(FI); applicant Valmet paper machinery inc.(FI). – 313133; application date 15.12.1988; publication date 24.01.1989.

39. Pat. № 5230165(US), Int. Cl.<sup>5</sup>F26B19/00. Dryer section/ Rudolf Beisswanger(GE); applicant J. M. Voith GmbH (GE). – 862194; application date 02.04.1992; publication date 27.07.1993.

40. Pat. № 5494406 (US), Int. Cl.<sup>6</sup> B05B 1/24. Coating device having infrared and suspension drying sections / Rudolf Beisswanger (GE); applicant J. M. Voith GmbH, (GE). – 862194; application date 02.04.1992; publication date 27.07.1993.

41. Pat. № 5592751 (US), Int. Cl.<sup>6</sup> F26B 11/02. Dryer section having combination of single and double tier dryer groups / Adolf Guggemos (GE); Markus Oechsle (GE) applicant Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH (GE). – 440087; application date 12.05.1995; publication date 14.01.1997.

42. Pat. № 5666744 (US), Int. Cl.<sup>6</sup> F26B 3/34. Infrared paper drying machine and method for drying a paper web in an infrared paper drying machine/ Benjamin A. Thorp (US) applicant James river corporation of Virginia(US). – 552123; application date 02.11.1995; publication date 16.09.1997.

43. Pat. № 5737848 US, Cl.<sup>6</sup> F26B 11/02. Guide roll arrangement for paper machine drying section / Tri Chau-Huu, Albrecht Meinecke, Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH (DE). – №617332; application date 18.03.96; publication date 14.04.98.

44. Pat. № 5756156(US), Int. Cl.<sup>6</sup>B05D3/02. Method for producing surface treated paper and dry end of a paper machine/ Seppo Elijoki (FI), Heikki Ilvespää (FI), applicant Valmet Corporation(FI). – 705059; application date 29.08.1996; publication date 26.05.1998.

45. Pat. № 5771603(US), Int. Cl.<sup>6</sup>D21F5/00. Dryer section/ Gerard Kotitschke (GE), Hans-Peter Sollinger (Ge), Markus Oechsle (Ge), applicant Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH(Ge). – 719390; application date 24.09.1996; publication date 30.05.1998.



46. Pat. № 9825421 (WO), Cl.<sup>6</sup>D21F 5/04. Method and installation for drying of fibrous web / Lehtinen, JukkaValmet Co. (FI). – №96845405.4; application date 12.11.94, publication date 15.04.03.

47. Pat. № DE20203105740U1 (US), Int. Cl.<sup>7</sup> D21F7/006. Arrangement for severing the fiber web in the drying section of a fiber web machine and a corresponding device/ applicant Metso Paper Inc. (DE). – 03100377.5; application date 12.17.2013; publication date 01.30.2014.

48. Pat. № EP0770731A1 (EPO), Int. Cl.<sup>6</sup>D21H25/06, F26B 13/10. Method and device in drying of a coating on a paper web or equivalent/ Heikkila Pertti(FI), Karlstedt Bertel (FI); applicant Valmet corporation(FI). – 96660067.8; application date 09.10.1996; publication date 02.05.1997.

49. Pat. № EP0943034B1(EPO), Int. Cl.<sup>7</sup>D21F5/04. Method for drying of paper and dry end of a paper machine/ Ahonen Pasi (FI), Kallioniemi Jaakko (FI); applicant Metso Paper, Inc. (FI). – 97946772.7; application date 02.12.1997; publication date 22.09.1999.

50. Pat. № EP1355003B1(EPO), Int. Cl.<sup>6</sup>D21F5/04. Drying section / Schleidt Bernhard(AT), Rollenitz Erich (AT); applicant Voight Paper Holding Gmbhand Co. (DE). – 03100377.5; application date 19.02.2003; publication date 22.10.2003.

51. Pat. № US6187137B1 (US), Int. Cl.<sup>7</sup>D21H27/00. Method of producing low density resilient webs / Frank Gerald Druecke (US); Shan Liang Chen (US); Alan Hermans (US); Sheng-Hsin (US); Richard Joseph Kamps (US); applicant Kimberly-Clark Worldwide, Inc.(US). – 08/961773; application date 31.10.1997; publication date 13.02.2001.

52. Pat. № US6412190B1 (US), Int. Cl.<sup>7</sup> F26B 7/00. Infrared and hot air dryer combination / Ythomas Smith (US), applicant. – 09/859317; application date 17.03.2001; publication date 02.07.2002.

53. Марчевський В.М. Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агенту в сушильній камері / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник

Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки - 2018. № 1 (81) – с. 38-42.

54. Marchevskii V. Kinetics of drying the titanium dioxide paste in the vortex dryer / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**, V. Telestakova // Ukrainian Food Journal – Volume 7, Issue2, 2018. – pp. 311-323.

55. Marchevskii V. Product grinding influence on the drying process of dispersed titanium dioxide paste / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**// Ukrainian Journal of Food Science – Volume6, Issue 1, 2018. – pp. 188-198.

56. Марчевський В.М. Задача ефективного управління процесом отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану в ході вихрової сушки/ Марчевський В.М., **Гробовенко Я.В.** // Автоматизація технологічних і бізнес процесів – Том 10, № 3, 2018. – с. 49-56.

57. Marchevskii V. Probation results of the original swirling drying apparatus for paste products/ V. Marchevskii, **Y. Grobovenko** // Mechanics and Advanced Technologies – Vol. 2, No. 83, 2018. – pp. 100-107.

58. Патент № 107088 Україна МПК F26B 3/084 (2006.01) Сушильна установка із псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

59. Патент № 107089 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Спосіб для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

60. Патент № 108688 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В.; Заявл. 09.02.2016; Опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

61. Патент № 131110 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних продуктів / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В., Візерський Д.С.; Заявл. 07.06.2018; Опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

62. Marchevskii V.M. Simulation of drying fine particles  $\text{TiO}_2$  in a stream of drying agent / V.M. Marchevskii, **Y.V. Grobovenko**, D.S. Vizerskyi / Scientific-discussion – 2017. № 3 – с. 21-24.
63. Марчевський В.М. Процес сушіння діоксиду титану / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // International Scientific Journal, 2016. №5 – с. 22-24.
64. Марчевський В.М. Процес сушіння пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Наукове товариство Smart and Young – 2016, Випуск № 11-12 – с. 55-57.
65. Марчевський В.М. Моделювання процесу сушіння тонкодисперсних часток  $\text{TiO}_2$  в потоці сушильного агента / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – 2016. № 1 – с. 25-27.
66. Марчевський В.М. Гідродинаміка вихрового сушильного апарату для пастоподібних продуктів / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Наука онлайн: Міжнародний електронний науковий журнал – 2018. – № 6.
67. Pettersson M. Absorption of infrared radiation and radiation transfer mechanism in paper / M. Pettersson, S. Stenstrom // Journal of Pulp and Paper Science. – 1998. – Vol. 24. – No. 11. – P. 349 – 355.
68. Pettersson M. Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part I: model and validation/ M. Pettersson, S. Stenström // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2000. – Vol. 43. – № 7. – P. 1209-1222.
69. Pettersson M. Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part II: modelling a paper dryer / M. Pettersson, S. Stenström // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2000. – Vol. 43. – № 7. – P. 1223-1232.
70. Pierrehumbert R.T. Infrared radiation and planetary temperature / R.T. Pierrehumbert // Physics Today. – 2011. – P. 33-38.

71. Ramaswamy S. Analysis of heat and mass transfer during drying of paper/board / S. Ramaswamy, R. A. Holm // *Drying Technology: An International Journal*. – 1999. – Vol. 17. – № 1-2. – P. 49-72.
72. Reardon S. A. A mathematical model for the simulation of paper drying energy consumption / S. A. Reardon, B.E. Hons. – Tasmania: University of Tasmania, 1994. – P. 314.
73. Reardon S. A. Friction, heat and mass transfer for paper drying / S. A. Reardon, M. R. Davis, P. E. Doe // *Heat Mass Transfer*. – 1998. – Vol. 41. – № 10. – P. 1313-1325.
74. Roonprasang K. Thermal analysis of multi-cylinder drying section with variant geometry / K. Roonprasang. – Dresden: Technical university of dresden, 2008. – P. 160.
75. Sanjabi F. Optimal Control of Continuous Infrared Dryers / F. Sanjabi, S. R. Upreti, R. Dhib // *Drying Technology: An International Journal*. – 2006. – Vol. 24. – № 5. – P. 581-587.
76. Seyed-Yagoobi J. An experimental study of gas-fired infrared drying of paper / J. Seyed-Yagoobi, J. W. Wirtz // *Drying Technology: An International Journal*. – 2001. – Vol. 19. – № 6. – P. 1099-1112.
77. Seyed-Yagoobi J. Drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters—optimum emitters' location within a paper machine drying section / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // *Drying Technology: An International Journal*. – 2003. – Vol. 21. – № 10. – P. 1897-1908.
78. Seyed-Yagoobi J. Experimental and Theoretical Study of Heating/Drying of Moist Paper Sheet with a Gas-Fired Infrared Emitter / J. Seyed-Yagoobi, A.N. Husain // *ASME Journal of Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 123. – № 4. – P. 711-718.
79. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of paper sheet with gas-fired infrared emitters-pilot machine trials / J. Seyed-Yagoobi, S. J. Sikirica, K. M. Counts // *Drying Technology: An International Journal*. – 2001. – Vol. 19. – № 3-4. – P. 639-654.

80. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of uncoated paper with gas-fired and electric infrared emitters – fundamental understanding / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)* (São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004). – Vol. B. – P. 1217-1224.
81. Shen S.Q. A model for paper drying computation based on the theory of heat and mass transfer in porous media / S.Q. Shen, T.Lu, S.F. Li // *China Pulp and Paper*. – 2003. – Vol. 22. – № 4. – P. 22–25.
82. Slätteke O. Modeling and control of the paper machine drying section / O. Slätteke. – Lund: Department of Automatic Control Lund University, 2006. – P. 247.
83. Soininen M. Modeling of web drying / M. Soininen // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 4. – P. 823-866.
84. Stenströ S. Evaluation of the energy efficiencies for a gas heated industrial infrared paper dryer / S. Stenströ, M. Johansson // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 5-7. – P. 1345-1358.
85. Vieira M. G. A. Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp / M. G. A. Vieira, L. Estrella, and S. C. S. Rocha // *Drying Technology: An International Journal*. – 2007. – Vol. 25. – № 10. – P. 1639-1848.
86. Weineisen H. Modeling drying and energy performance of industrial through-dryers / H. Weineisen, S. Stenströma // *Drying Technology: An International Journal*. – 2008. – Vol. 26. – № 6. – P. 776-785.
87. Wilhelmsson B. Heat and mass transfer coefficients in computersimulation of paper drying / B. Wilhelmsson, S. Stenstrom // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 4. – P. 959-975.
88. Yeo Y.-K. Modeling of the drying process in paper plants / Y.-K. Yeo, K.-S. Hwang, S. C. Yi, H. Kang // *Korean journal of chemical engineering*. – 2004. – Vol. 21. – № 4. – P. 761-766.
89. Ахназарова С Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 327 с., ил.

90. Бойков Л. М. Факторы, влияющие на эффективность работы сушильных установок бумагоделательных и картоноделательных машин / Л.М. Бойков, Н.С. Нечаев // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011. – Т. 1. – № 15. – С. 26-28.

91. ГОСТ 7376-89 Картон гофрированный. Общие технические условия.

92. Дешко В. И. Исследование теплообмена при кристаллизации фтористого кальция/ В. И. Дешко, А. Я. Карвацкий // Промышленная теплотехника. — 1988. — Т. 10, №1.— С. 60–65.

93. Дешко В. І. Математичне моделювання та експериментальні дослідження складного теплообміну при рості кристалів: монографія / В. І. Дешко, А. Я. Карвацький, Ю. В. Лохманець, О. М. Кудін, О. В. Колесніков; НАН України, Ін-т сцинтиляц. матеріалів. - Харків : ІСМА, 2012. — 247 с.

94. ДСТУ7377-85 Бумага для гофрирования. Технические условия.

95. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. 2-е испр. и доп. Л.: Наука, Ленинградское отд., 1967. 88 с.

96. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл ; пер. с англ. ; под ред. Б. А. Хрусталева. — М. : Мир, 1975. — 934 с.

97. Иванов С. Н. Технология бумаги : [учеб. пособ.] / С.Н. Иванов. — М.: Гослесбумиздат, 1960. — 719 с.

98. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.

99. Карвацький А. Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 391 с.: іл. – Бібліогр.: с. 385–387.– Режим доступу до журн.:

<http://cpsm.kpi.ua/publikatsiji/knigi/957-metod-skinchennikh-elementiv-u-zadachakh-mekhaniki-sutsilnikh-seredovishch-programna-realizatsiya-ta-vizualizatsiya-rezultatativ.html>

100. Карвацький А. Я. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання: навч. посіб. — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — 234 с.
101. Корнієнко Я. М. Процеси та обладнання хімічної технології : підручник: [у 2 ч.]. Ч. 1 / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, В. Л. Ракицький, Г. Л. Рябцев; МОНМС України, НТУУ "Київ. політехн. ін-т". - К., 2011. - 300 с. - Бібліогр.: 32 назв - укр.
102. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков – М., Энергия, 1968. – 472 с.
103. Перри Д.Г. Справочник инженера-химика. Т 1. – Л. : Химия, 1969. – 504 с.
104. Пилимчук М. І. Основи наукових досліджень: Підручник / М. І. Пилимчук, А. С. Григор'єв, В. В. Шостак // – К.: Знання, 2007. – 270 с.
105. Самарский А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. — М. : Наука, 1980. — 352 с.
106. Сергеев О. А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов / О. А. Сергеев, А. А. Мень. — Изд-во стандартов, 1977. — 288 с.
107. Тарифы на природный газ [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://index.minfin.com.ua/tarif/gas/>
108. Тарифы на электрическую энергию (кроме населения) [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://kyivenergo.ua/ru/ee-company/tarifi>

**ДОДАТОК А.**  
**ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ**  
**СУШІННЯ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ**



Інтегрування диференціальних рівнянь проведено із використанням метода Рунге-Кутта 4 порядку.

Вихідні дані розрахунку:

Продуктивність сушильного апарату по випареній волозі,  $G_{H_2O} = 500$  кг/год.; Початкова вологість пасти,  $w_{\Pi} = 40 \%$ ;

Кінцева залишкова вологість порошку  $TiO_2$ ,  $w_K = 0,3 \%$ ;

Температура теплоносія на вході в апарат,  $t_{\Pi} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Температура теплоносія на виході із сушильного апарату,  $t_K = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Початкова температура пасти  $TiO_2$ ,  $t_0 = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Початковий еквівалентний діаметр агломератів пасти, що потрапляють в зону диспергування,  $d_{\text{екв}} = 0,003 \text{ м}$ ;

Початкова температура теплоносія до калорифера,  $t'_0 = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Коефіцієнт тепловіддачі для зони диспергування  $\alpha_1 = 150 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ , для зони досушування  $\alpha_1 = 4280 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ ;

Відносна вологість повітря на вході в калорифер,  $\varphi_0 = 50\%$ ;

Коефіцієнт теплових втрат,  $\psi = 0,9$ ;

Питома теплоємність діоксиду титану,  $c_{TiO_2} = 760 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

Питома теплоємність води при  $t = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $c_{H_2O} = 4186 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

Питома теплота пароутворення,  $r = 2466 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;

Густина сухого порошку  $TiO_2$ ,  $\rho_{TiO_2} = 4230 \frac{\text{кг} TiO_2}{\text{м}^3}$ ;

Густина води при  $t = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_{H_2O} = 998 \frac{\text{кг} H_2O}{\text{м}^3}$ ;

Густина повітря при середній  $t = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_{\Pi} = 0,674 \frac{\text{кг} \Pi}{\text{м}^3}$ ;

Кінематична в'язкість повітря при середній  $t = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_0 = 4,06 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;

Тиск насиченої пари  $P_s = 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^{3,8197}$ , Па;

Діаметр частинок в зоні досушування  $d_{\text{част}} = 12..15 \text{ мкм}$ .

Блок-схема розрахунку представлена на рисунку А.1.

Представлена блок-схема актуальна для розрахунку зміни вологовмісту та температури пасти діоксиду титану від часу сушіння та досушування у вихрових потоках теплоносія:

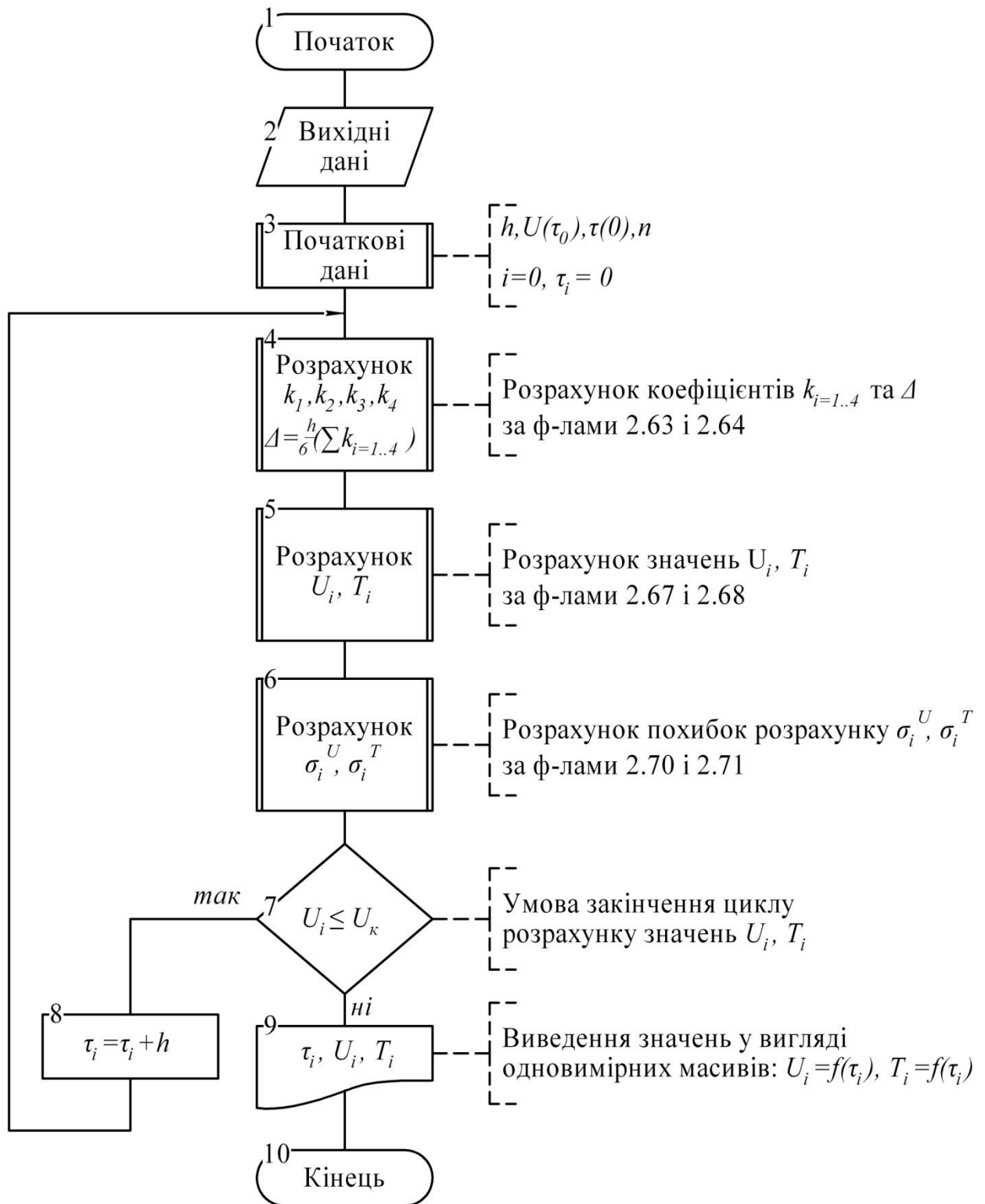


Рисунок А.1 – Блок-схема розрахунку математичної моделі

Ідентифікатори програми наведені в таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Ідентифікатори програми

№	Назва ідентифікатора	Позначення	
		Оригінал	У програмі
1	Температура сушильного агенту, °С	$t_{c.a.}$	$t_{c.a.}$
2	Температура частинки діоксиду титану, °С	$t_{\text{ч}}$	$t_{chast}$
3	Температура мокрого термометра, °С	$t_{\text{м.т.}}$	$t_{\text{м.т.}}$
4	Коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\alpha$	$\alpha$
5	Рівноважний вологовміст, $\frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$	$U_p$	$U_r$
6	Крок розрахунку	$h$	$h$
7	Питома теплоємність порошку $\text{TiO}_2$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$c_{\text{TiO}_2}$	$c1$
8	Питома теплоємність води $\text{TiO}_2$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$c_{\text{в}}$	$c2$
9	Питома теплоємність теплоносія, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$c_{\text{с.а.}}$	$c_{ca}$
10	Питома теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$r$	$r$
11	Коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$K$	$K$
12	Поверхня тонкодисперсної частинки $\text{TiO}_2$ , $\text{м}^2$	$F_{\text{ч}}$	$F$
13	Теплові втрати, %	$\varphi$	$\varphi$
14	Перший критичний вологовміст, $\frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_{\text{а.с.м.}}}$	$U_{\text{лкр}}$	$last\_u$
15	Відносна вологість матеріалу $\text{TiO}_2$ , %	$w$	$W$
16	Час сушіння, с	$\tau$	$\tau$
17	Концентрація тонкодисперсних частинок $\text{TiO}_2$ у виділеному об'ємі, $\frac{\text{кг}_\text{ч}}{\text{кг}_{\text{сум.}}}$	$x$	$x$
18	Густина теплоносія, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{\text{с.а.}}$	$R_{ca}$
19	Густина матеріалу $\text{TiO}_2$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{\text{част.}}$	$R_{\text{част}}$
20	Швидкість сушіння, $\frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{с}}$	$\frac{dU}{d\tau}$	$uu$

Програма розрахунку зміни вологовмісту та температури матеріалу діоксиду титану від часу сушіння, виконана в середовищі Mathcad Prime 15.0:

Програма 1.

$$\begin{aligned}
 t_{n.a.} &:= 150 & \alpha &:= 950 & \text{middlePoint} &:= .25 & U_0 &:= 1.174 & i &:= 0 & F_{xxx} &:= 3.14 \cdot 10^{-6} & h &:= 0.1 \\
 t_{i.o.} &:= 37 & t_{chast} &:= 15 & r &:= 2466 \cdot 10^3 & j &:= 1..40 & \tau_j &:= 1 + j & G_{xxx} &:= 10^{-5} & U_{\tau_{0,0}} &:= U_0 \\
 K_{xxx} &:= 0.095 & U_r &:= .005 & U_1 &:= 0.25 & c_1 &:= 760 & c_2 &:= 4180 & b &:= U_0 & U_{\tau_{0,1}} &:= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{calculate\_U\_t\_}\tau(\tau, \text{index}, \text{array}) &:= \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0, 0.01.. \tau \\ \quad k_1 \leftarrow \frac{\alpha \cdot (t_{n.a.} - t_{i.o.})}{r} \\ \quad \text{array}_{\text{index}, 0} \leftarrow \text{array}_{\text{index}-1, 0} - \text{delta}(i, \text{array}_{\text{index}-1, 0}, h, k_1) \\ \quad \text{array}_{\text{index}, 1} \leftarrow \text{array}_{\text{index}-1, 0} - \text{array}_{\text{index}, 0} \\ \quad \text{array}_{\text{index}, 2} \leftarrow i + 0.01 \\ \quad \text{index} \leftarrow \text{index} + 1 \\ \text{return array} \end{array} \right. \\
 \text{delta}(a, b, h, k_1) &:= \left| \begin{array}{l} k_2 \leftarrow a + \frac{h}{2} + b + \frac{h \cdot k_1}{2} \\ k_3 \leftarrow a + \frac{h}{2} + b + \frac{h \cdot k_2}{2} \\ k_4 \leftarrow a + h + b + h \cdot k_3 \\ \Delta \leftarrow \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ \text{return } \Delta \end{array} \right. \\
 \tau_{xxx} &:= \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..20 \\ \quad W_i \leftarrow \tau \\ \quad \tau \leftarrow \tau + 0.1 \\ \text{return } W \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Досушування:

$$Nu := 2 \quad d := 3 \cdot 10^{-6} \quad \lambda := 2.884 \cdot 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{при температурі } 150 \text{ градусів}$$

$$n := 1.3 \cdot 10^9 \quad n - \text{кількість частинок}$$

$$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = 1.923 \times 10^4$$

$$t_{ca} := 150 \quad U_1 := 0.25$$

$$\varphi := 0.8 \quad x := 0.01 \quad K_{xxx} := 1.3 \cdot 10^{-10} \quad F_{xxx} := \pi \cdot d^2 \cdot n = 0.037$$

$$t_1 := 50 \quad \text{last\_u} := 0.25 \quad R_{\tau_{a\tilde{n}\tilde{o}}} := 4230 \quad R_{ca} := 0.94 \quad \tilde{n}_{\tau_{a\tilde{n}\tilde{o}}} := 527$$

$$V_{xxx} := 1 \quad t_{\tau_{a\tilde{n}\tilde{o}}} := t_1 \quad r := 2260 \cdot 10^3 \quad \tilde{n}_{ca} := 1009$$

```

U := | for i ∈ 1..300
      |   τ ← τ + 0.1
      |   
$$H_i \leftarrow U_1 - K \cdot F \cdot \frac{17.14 \cdot t_{ca}}{235.3 + t_{ca}} \frac{133.334.579e}{0.5 \cdot d} (1 - \varphi) \cdot$$

      |   
$$uu \leftarrow \frac{(last\_u - H_i)}{.1}$$

      |   
$$t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} \leftarrow 50 + \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}})}{x \cdot V \cdot R_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} \cdot \tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} - \frac{uu \cdot r}{\tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} \right] \cdot \tau$$

      |   
$$t_{ca} \leftarrow 150 - \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}})}{(1 - x) \cdot V \cdot R_{ca} \cdot \tilde{n}_{ca}} \right] \cdot \tau$$

      |   last_u ← Hi
      | return H

P := | for i ∈ 1..300
      |   τ ← τ + 0.1
      |   
$$H_i \leftarrow U_1 - K \cdot F \cdot \frac{17.14 \cdot t_{ca}}{235.3 + t_{ca}} \frac{133.334.579e}{0.5 \cdot d} (1 - \varphi) \cdot \tau$$

      |   
$$uu \leftarrow \frac{(last\_u - H_i)}{.1}$$

      |   
$$t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} \leftarrow 50 + \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}})}{x \cdot V \cdot R_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} \cdot \tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} - \frac{uu \cdot r}{\tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} \right] \cdot \tau$$

      |   tca ← tca - 1
      |   last_u ← Hi
      |   
$$Q_i \leftarrow t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} + \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}})}{x \cdot V \cdot R_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}} \cdot \tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} + \frac{uu \cdot r}{\tilde{n}_{\div \grave{\alpha} \tilde{n} \grave{o}}} \right] \cdot \tau$$

      | Q

```

```

L := for i ∈ 1..10
    τ ← τ + 0.1
    
$$H_i \leftarrow U_1 - K \cdot F \cdot \frac{17.14 \cdot t_{ca}}{235.3 + t_{ca} (1 - \phi) \cdot \tau}$$

    
$$uu \leftarrow \frac{(last\_u - H_i)}{.1}$$

    
$$t_{\div \tilde{\div}} \leftarrow t_{\div \tilde{\div}} + \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \tilde{\div}})}{x \cdot V \cdot R_{\div \tilde{\div}} \cdot \tilde{\div \div}} + \frac{uu \cdot r}{\tilde{\div \div}} \right] \cdot \tau$$

    
$$t_{ca} \leftarrow \left[ \frac{\alpha \cdot F \cdot (t_{ca} - t_{\div \tilde{\div}})}{(1 - x) \cdot V \cdot R_{ca} \cdot \tilde{n}_{ca}} \right] \cdot \tau$$

    last_u ← Hi
    Qi ← 150 - tca
Q

```

За результатами виконання програми 1 отримані наступні результати:

L =

	0
0	150
1	150
2	149.999
3	149.999
4	149.999
5	149.998
6	149.998
7	115
8	113
9	111
10	108
11	105
12	
13	
14	

τ =

	0
5	0.4
6	0.5
7	0.6
8	0.7
9	0.8
10	0.9
11	1
12	1.1
13	1.2
14	1.3
15	1.4
16	1.5
17	1.6
18	1.7
19	1.8
20	...

U =

	0
0	1.174
1	1.143
2	1.113
3	1.082
4	1.051
5	1.02
6	0.99
7	0.959
8	0.928
9	0.898
10	0.867
11	0.836
12	0.806
13	0.775
14	0.745
15	0.714
16	0.684
17	0.653
18	0.623
19	0.592
20	0.562
21	0.532
22	0.502
23	0.472
24	0.442
25	0.412
26	0.382
27	0.352
28	0.322
29	0.292
30	0.262
31	0.233
32	0.203
33	0.174
34	0.144
35	0.115
36	0.085
37	0.056
38	...

T =

	0
0	0
1	50.655
2	52.288
3	54.728
4	57.818
5	61.411
6	65.373
7	69.58
8	73.917
9	78.281
10	82.577
11	86.719
12	90.63
13	94.24
14	97.487
15	100.316
16	102.681
17	104.54
18	105.858
19	106.606
20	...

calculate\_U\_t\_τ(60,1,U\_τ) =

	0	1	2
0	1.174	0	0
1	1.0662	0.1078	0.01
2	0.9669	0.0993	0.02
3	0.8753	0.0916	0.03
4	0.7908	0.0845	0.04
5	0.7127	0.078	0.05
6	0.6406	0.0721	0.06
7	0.5738	0.0667	0.07
8	0.512	0.0618	0.08
9	0.4547	0.0573	0.09
10	0.4015	0.0532	0.1
11	0.352	0.0495	0.11
12	0.3059	0.046	0.12
13	0.263	0.0429	0.13
14	0.2229	0.0401	0.14
15	0.1855	0.0375	0.15
16	0.1504	0.0351	0.16
17	0.1175	0.0329	0.17
18	0.0866	0.0309	0.18
19	0.0575	0.0291	0.19
20	0.0301	0.0274	0.2
21	0.0041	0.0259	...

**ДОДАТОК Б.**  
**РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ**



Прямим вимірюванням підлягали вимірювання температури і вологості теплоносія на вході в сушильну камеру, у псевдозрідженому шарі частинок  $\text{TiO}_2$  та на виході із камери, маси матеріалу, часу проведення експерименту, відносної вологості та температури повітря над поверхнею матеріалу  $\text{TiO}_2$ , перепад тиску в псевдозрідженому шарі, дисперсний склад частинок матеріалу.

### **Б.1 Розрахунок похибки вимірювання температури теплоносія на вході до сушильної камери**

Гранична похибка  $\Delta T_{\text{вх}}$  включає систематичну похибку приладу  $\sigma_{\Sigma}$  і похибку термопари  $\Delta_T$ , визначену при її таруванні в діапазоні температур 150-210 °C, °C :

$$\Delta T_{\text{вх}} = |\sigma_{\Sigma}| + |\Delta_T| \quad (\text{Б.1})$$

Сумарна систематична похибка приладу визначається за формулою, °C:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (\text{Б.2})$$

де  $\sigma_{\text{прил}}^2$  – похибка приладу А-565-002-01, класу точності  $r=0,15/0,05$  і визначається за виразом, °C:

$$\sigma_{\text{прил}} = \pm \frac{\Delta}{3}, \quad (\text{Б.3})$$

де  $\Delta$  – гранична абсолютна паспортна похибка, °C:

$$\Delta = \pm \left( \frac{0,15 - 0,05}{100} \cdot |T_{\text{вх}}| + \frac{0,05}{100} \cdot |T_{\text{к}}| \right), \quad (\text{Б.4})$$

де  $T_{\text{вх}}$  – значення найбільшої температури теплоносія,  $T_{\text{вх}} = 230$  °C;  $T_{\text{к}}$  – найбільша по абсолютній величині, гранична температура виміру приладом,  $T_{\text{к}} = 800$  °C.

Тоді похибка приладу розраховується:

$$\sigma_{\text{прил}} = \pm \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{0,15 - 0,05}{100} \cdot 230 + \frac{0,05}{100} \cdot 800 \right) = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.5})$$

Похибка зчитування розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{окр}}^2 = \frac{\delta}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $\delta$  – значення одиниці найменшого розряду цифрового табло приладу А565-002-0,  $\delta = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Тоді числове значення систематичної похибки приладу за формулою (Б.2) дорівнює:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,029^2} = 0,202 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.6})$$

Величина похибки показань термопар  $\Delta_T = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Тоді похибка вимірювання теплоносія на вході в сушильну камеру за формулою (Б.1) становитиме:

$$\Delta T_{\text{вх}} = |\sigma_{\Sigma}| + |\Delta_T| = 0,202 + 0,2 = 0,402 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.7})$$

## **Б.2 Розрахунок похибки вимірювання температури псевдозрідженого шару частинок пасти $\text{TiO}_2$ в зоні диспергування**

Температура  $T_{\text{ш}}$  визначається за допомогою платинового терморезистора РТ100 із діапазоном вимірюваних температур  $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$  до  $+500 \text{ } ^\circ\text{C}$  та точністю вимірювання  $\pm 0,3 - 0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ , частота вимірювання 60 Гц та приладом А 565-003-01 класу точності  $r = 0,15 / 0,05$ . Гранична похибка  $T_{\text{ш}}$  аналогічно формулі Б.1, складається із  $\sigma_{\Sigma}$  та  $\Delta_T$ , що визначалась при значенні температур 90-120  $^\circ\text{C}$ .

Величина похибки показань даної термопар  $\Delta_T = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Розраховуючи відповідні величини за формулами (Б.1-Б.4) похибка вимірювання температури в псевдозрідженому шарі складатиме  $\Delta T_{\text{ш}} = 0,302 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### **Б.3 Розрахунок похибки вимірювання перепаду тиску в псевдозрідженому шарі $\Delta P_{\text{ш}}$ частинок пасти $\text{TiO}_2$ в зоні диспергування**

Перепад тиску на псевдозрідженому шарі  $\Delta P_{\text{ш}}$  вимірювали за допомогою датчиків малих тисків (MPXV7007DP) та ПК.

Гранична похибка вимірювання складається з похибок вимірювань  $\Delta h$  і похибок приладу  $\sigma_{\text{прил}}$ , Па:

$$\Delta P = \Delta h + \sigma_{\text{прил}} \quad (\text{Б.8})$$

Похибка вимірювань розраховується за формулою:

$$\Delta h = \frac{1}{2} \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot 0,0000001 = 0,00000005 \text{ Па}, \quad (\text{Б.9})$$

де  $\delta$  – значення одиниці найменшого розряду цифрового табло,  $\delta = 0,0000001$  Па.

Похибка приладу  $\sigma_{\text{прил}} = 0,1$  Па.

Виконавши підстановку значень  $\sigma_{\text{прил}}$  та  $\Delta h$  у формулу (Б.8) отримаємо:

$$\Delta P = \Delta h + \sigma_{\text{прил}} = 0,00000005 + 0,1 = 1,00000005 \text{ Па} \quad (\text{Б.10})$$

Тобто значення граничної похибки дорівнює:

$$\Delta P = \pm 0,1 \text{ Па} \quad (\text{Б.11})$$

### **Б.4 Розрахунок похибки вимірювання маси сухого порошку $\text{TiO}_2$ , який вивантажується з рукавного фільтру**

Гранична похибка визначення маси порошку  $\text{TiO}_2$  складається з похибки терезів  $\sigma_{\text{прил}}$  і похибки зчитування показань  $\sigma_{\text{окр}}$ , кг:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} \quad (\text{Б.12})$$

Похибка терезів  $\sigma_{\text{прил}}$  розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{прил}} = \frac{\delta}{6} = \frac{0,005}{6} = 0,0008 \text{ кг}, \quad (\text{Б.13})$$

де  $\delta$  – ціна поділок шкали терезів,  $\delta = 0,005$  кг.

Похибка зчитувань дорівнює:

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{\delta}{\sqrt{12}} = \frac{0,005}{\sqrt{12}} = 0,0014 \text{ кг}, \quad (\text{Б.14})$$

Виконавши підстановку отриманих значень у вираз (Б.12) одержимо числове значення граничної похибки терезів:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \sqrt{0,0008^2 + 0,0014^2} = 0,0016 \text{ кг}$$

Тобто значення граничної похибки дорівнює:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \pm 0,002 \text{ кг}$$

Якщо прийняти, що середня величина маси матеріалу діоксиду титану при вивантаженні складає  $M_{\text{гр.пр.}} = 0,5$  кг, то гранична відносна похибка визначиться:

$$\delta(M_{\text{гр.пр.}}) = \frac{\Delta M_{\text{гр.пр.}}}{M_{\text{гр.пр.}}} \cdot 100\% = \frac{0,002}{0,5} \cdot 100\% = 0,4 \quad (\text{Б.15})$$

## **Б.5 Розрахунок похибки визначення дисперсного складу частинок у псевдозрідженому шарі**

Масові відсотки окремих фракцій  $X_i$  визначається за виразом, %:

$$X_i = \frac{M_i}{M_{\text{ш}}} \cdot 100\%, \quad (\text{Б.16})$$

де  $M_i$  – маса окремої  $i$ -тої фракції, яка має розміри частинок  $D_{o_1} < D < D_{o_2}$ , кг;  $D_{o_1}$  та  $D_{o_2}$  – розміри отворів двох сусідніх сит при проведенні ситового аналізу, мм;  $D$  – поточний діаметр гранул, мм.

Маса окремої фракції  $M_i$  визначається на терезах з точністю  $\delta = 0,001$  кг. Тоді гранична похибка визначення маси зразка окремої фракції розраховується за формулою:

$$\Delta M_i = \frac{\delta}{2} = \frac{0,001}{2} = 0,0005 \text{ кг} \quad (\text{Б.17})$$

Згідно методики маса зразка, для ситового аналізу дорівнює 0,1 кг, тобто,  $\sum_{i=1}^n M_i = 0,1 \text{ кг}$ .

Виконавши підстановку отриманих величин до виразу (Б.16) одержимо вираз для розрахунку масового відсотка  $i$  – тої фракції  $X_i$ :

$$X_i = \frac{M_i}{0,1} \cdot 100\% = M_i \cdot 1000\%$$

Із досліду маємо, що до 1% від маси окремої фракції становлять частинки, які застряли в отворах сит, і не пройшли отвори сита по випадковій причині.

Таким чином гранична похибка визначення масового відсотка  $i$  – тої фракції розраховується за виразом:

$$\Delta X_i = 0,5 + 0,01 \cdot X_i \% \quad (\text{Б.18})$$

Звідси випливає, що гранична абсолютна похибка визначення процентного вмісту буде для найбільшої фракції, тобто коли вміст фракції становить 80%:

$$\Delta X_i = 0,5 + 0,01 \cdot 80 = 1,3\%$$

#### **А.6 Визначення похибки масових витрат пасти діоксиду титану при подачі в сушильну камеру**

Гранична похибка різниці маси пасти  $\text{TiO}_2$  в ємності  $\Delta L$  дорівнює, кг:

$$\Delta L = \Delta L_i + \Delta L_{i+1}, \quad (\text{Б.19})$$

де  $\Delta L_i$  – похибка одного вимірювання маси пасти в ємності, яка визначається за виразом:

$$\Delta L_i = \frac{\delta}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ кг} \quad (\text{Б.20})$$

де  $\delta$  – ціна поділки шкали вимірювання маси в ємності пасти,  $\delta = 0,05$  кг.

Приймаємо, що  $\Delta L_i = \Delta L_{i+1}$ . Тоді:

$$\Delta L = 0,025 + 0,025 = 0,05 \text{ кг}$$

Тоді гранична відносна похибка, при мінімальній витраті  $\Delta L_i = 1,5$  кг становить:

$$\delta(L) = \frac{\Delta L}{\Delta L_i} \cdot 100\% = \frac{0,05}{1,5} \cdot 100\% = 3,3\% \quad (\text{Б.21})$$

### **Б.7 Розрахунок похибки визначення маси частинок матеріалу $\text{TiO}_2$ у псевдозрідженому шарі**

Маса частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$  визначалась за формулою:

$$M_{\text{ш}} = 1,25 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ш}} \cdot S}{g}, \quad (\text{Б.22})$$

де  $\Delta P_{\text{ш}}$  – перепад тиску на шарі, що має граничну похибку  $\Delta P_{\text{ш}} = 0,1$  Па;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $S$  – площа поперечного перерізу сушильного апарата в зоні диспергування, що визначається за виразом,  $\text{м}^2$ :

$$S = R^2, \quad (\text{Б.23})$$

де  $R$  – радіус поперечного перерізу конусоподібного сушильного апарата в зоні диспергування, м.

Відносна гранична похибка маси частинок діоксиду титану у псевдозрідженому шарі визначається за виразом:

$$\delta(M_{\text{ш}}) = \delta(\Delta P_{\text{ш}}) + \delta(S) + \delta(g), \quad (\text{Б.24})$$

де  $\delta(\Delta P_{\text{ш}})$  – відносна гранична похибка гідравлічного опору псевдозрідженого шару при найбільшому значенні  $P_{\text{ш}} = 2000$  Па розраховується за виразом:

$$\delta(\Delta P_{\text{ш}}) = \frac{\Delta P_{\text{ш}}}{P_{\text{ш}}} \cdot 100\% = \frac{0,1}{2000} \cdot 100\% = 0,005\% \quad (\text{Б.25})$$

де  $\delta(S)$  – відносна гранична похибка площі перерізу сушильного апарата:

$$\delta(S) = \delta(A) + \delta(B) = 0,3 + 0,9 = 1,2\%, \quad (\text{Б.26})$$

де  $\delta(A)$  – відносна похибка довжини перерізу апарату:

$$\delta(A) = \frac{1}{A} \cdot 100\% = \frac{1}{300} \cdot 100\% = 0,3\%, \quad (\text{Б.27})$$

де  $A$  – характерний розмір сушильного апарату (радіус перерізу апарату в зоні досушування,  $A = 300$  мм);  $\delta(B)$  – відносна похибка радіусу перерізу апарату в зоні диспергування:

$$\delta(B) = \frac{1}{B} \cdot 100\% = \frac{1}{110} \cdot 100\% = 0,9\%, \quad (\text{Б.28})$$

де  $B$  – радіус перерізу сушильного апарату в зоні диспергування,  $B = 110$  мм;  $\delta(g)$  – відносна гранична похибка величини прискорення сили земного тяжіння:

$$\delta(g) = \frac{\Delta g}{g} \cdot 100\% = \frac{0,005}{9,81} \cdot 100\% = 0,05\%, \quad (\text{Б.29})$$

де  $\Delta g$  – абсолютна гранична похибка прискорення, що визначається як половина одиниці десяткового розряду, що відповідає останній достовірній цифрі значення прискорення,  $\Delta g = 0,005$  м/с<sup>2</sup>.

Виконавши підстановку одержаних значень відносних похибок у виразі (Б.24) одержимо числове значення відносної граничної похибки визначення маси порошку діоксиду титану, що накопичився у рукавному фільтрі:

$$\delta(M_{\text{ш}}) = 0,005 + 1,2 + 0,05 = 1,255\%$$

Гранична похибка маси порошку  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі при масі  $M_{\text{ш}} = 2,7$  кг, буде розраховуватись за виразом:

$$\Delta M_{\text{ш}} = \frac{\delta(\Delta M_{\text{ш}})}{100 \%} \cdot M_{\text{ш}} = \frac{1,9}{100 \%} \cdot 2,7 = 0,0513 \text{ кг} \quad (\text{Б.30})$$

### **Б.8 Розрахунок похибки визначення еквівалентного діаметра частинок діоксиду титану у псевдозрідженому шарі**

Розрахунки в різних дослідях показали, що відносна похибка визначення еквівалентного діаметра частинок у псевдозрідженому шарі не перевищує 6%:

$$\delta(D_e) = 6\%$$

### **Б.9 Розрахунок похибки визначення загальної поверхні контакту частинок матеріалу $\text{TiO}_2$ із теплоносієм у псевдозрідженому шарі**

Загальна площа поверхні частинок  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі визначається за формулою:

$$f_{\text{ш}} = \frac{6 \cdot M_{\text{ш}}}{D_e \cdot \rho_{\text{т}}} \quad (\text{Б.31})$$

де  $D_e$  – еквівалентний діаметр частинок  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі в зоні диспергування, м;  $\rho_{\text{т}}$  – адитивна густина твердих частинок  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі в зоні диспергування,  $\text{кг/м}^3$ .

Відносна похибка визначення загальної поверхні частинок у псевдозрідженому шарі визначиться за виразом:

$$\delta(f_{\text{ш}}) = \delta(M_{\text{ш}}) + \delta(D_e) + \delta(\rho_{\text{т}}) = 1,9 + 6 + 0,04 = 7,94\%, \quad (\text{Б.32})$$

де  $\delta(M_{\text{ш}})$  – відносна гранична похибка визначення маси частинок матеріалу в сушильному апараті,  $\delta(M_{\text{ш}}) = 1,9\%$ ;  $\delta(D_e)$  – відносна гранична похибка визначення еквівалентного діаметра частинок у псевдозрідженому шарі,  $\delta(D_e) = 6\%$ ;  $\delta(\rho_{\text{т}})$  – відносна гранична похибка визначення густини твердих частинок:



$$\delta(\rho_T) = \frac{\Delta\rho_T}{\rho_T} \cdot 100\% = \frac{0,5}{1450} \cdot 100\% = 0,04\%, \quad (\text{Б.33})$$

$\Delta\rho_T$  – величина абсолютної граничної похибки густини частинок діоксиду титану визначається половиною одиниці десяткового розряду, що відповідає останній вірній цифрі значення густини частинок,  $\Delta\rho_T = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_T$  – густина твердих частинок у шарі,  $\rho_T = 1450 \text{ кг/м}^3$ .

Чисельне значення граничної похибки визначення загальної поверхні частинок  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі при найбільшому значенні  $f_{\text{ш}} = 12 \text{ м}^2$  становить:

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{\delta(f_{\text{ш}}) \cdot f_{\text{ш}}}{100\%} = \frac{7,94 \cdot 12}{100\%} = 0,952 \quad (\text{Б.34})$$

## Б.10 Визначення похибок прямих вимірювань вологості теплоносія

Вологість повітря визначалась різницею за допомогою датчика-модуля вологи і температури GY-21 HTU21, в якому застосовується мікросхема із інтерфейсом I2C, яка забезпечує промислову точність вимірювань. Діапазон робочої напруги датчика становить від 1,9 до 3,6 В, напруга живлення дорівнює 5-6 В, а струм в активному режимі і в режимі очікування становить 150 мкА і 60 пА відповідно.

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання температури:

– сухого термометру

$$S_{\text{с.т.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,16}{5-1}} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.35})$$

– мокрого термометру

$$S_{\text{м.т.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,112}{5-1}} = 0,167 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.36})$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки сухого та мокрого термометрів:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,2}{3} = 0,067 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Б.37})$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

– сухого термометру

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,067}{0,2} = 0,333$$

– мокрого термометру

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,067}{0,167} = 0,398$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання температури:

– сухого термометру

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,2 + 2,8 \frac{0,2}{\sqrt{5}} = 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

– мокрого термометру

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,2 + 2,8 \frac{0,167}{\sqrt{5}} = 0,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де  $t_\alpha$  – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів  $n=5$  становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури сухого термометру визначається як:

$$t_{\text{сух}} = \overline{t_{\text{сух}}} \pm \Delta_\Sigma = \overline{t_{\text{сух}}} \pm 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де  $\overline{t_{\text{сух}}}$  – значення температури повітря, виміряне сухим термометром.

Дійсне значення температури мокрого термометру визначається як:

$$t_{\text{мок}} = \overline{t_{\text{мок}}} \pm \Delta_\Sigma = \overline{t_{\text{мок}}} \pm 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де  $\overline{t_{\text{мок}}}$  – значення температури повітря, виміряне мокрим термометром.

## **Б.11 Визначення похибок прямих вимірювань електричної потужності калорифера та приводу диспергатора**

Дійсна електрична потужність вимірювалася комплектом типу K50

№1654 із номінальною областю частот від 45 до 65 Гц. Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання потужності:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{480}{5-1}} = 10,95 \text{ Вт}, \quad (\text{Б.38})$$

де  $(\bar{x} - x_i)$  – різниця вимірювань потужності, Вт;  $n$  – кількість замірів потужності.

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ Вт}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{6,67}{10,95} = 0,609$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання потужності:

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 20 + 2,8 \frac{10,95}{\sqrt{5}} = 33,72 \text{ Вт},$$

де  $t_\alpha$  – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів  $n=5$  становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури повітря визначається як:

$$W = \bar{W} \pm \Delta_\Sigma = \bar{W} \pm 33,72 \text{ Вт}, \quad (\text{Б.39})$$

де  $\bar{W}$  – виміряне ватметром значення електричної потужності, Вт.

## Б.12 Визначення похибок прямих вимірювань часу

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання часу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,131}{5-1}} = 0,181 \text{ с}, \quad (\text{Б.40})$$

де  $(\bar{x} - x_i)$  – різниця замірів часу при сушінні пасти діоксиду титану, с;  $n$  – кількість замірів.

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,01}{3} = 0,003 \text{ с}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,003}{0,181} = 0,018$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання часу:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,01 + 2,8 \frac{0,181}{\sqrt{5}} = 0,237 \text{ с}$$

де  $t_{\alpha}$  – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів  $n=5$  становить 2,8.

Тоді дійсне значення часу визначається як:

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{\tau} \pm 0,237 \text{ с} \quad (\text{Б.41})$$

де  $\bar{\tau}$  – виміряне секундоміром значення часу, с.

### Б.13 Визначення похибок непрямих вимірювань

Непрямим вимірюванням підлягають визначення вологовмісту матеріалу  $\text{TiO}_2$  та швидкості сушіння.

Зазначені величини є функцією багатьох змінних  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

Тому абсолютне значення похибки визначаємо за такою залежністю:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_{\Sigma i} \right)^2}, \quad (\text{Б.42})$$

де  $\frac{\partial f}{\partial X_i}$  – часткова похідна по змінній  $X_i$ ;  $\Delta_{\Sigma i}$  – сумарна абсолютна похибка по змінній  $X_i$ .

### Б.14 Визначення похибок непрямих вимірювань вологовмісту матеріалу діоксиду титану

Вологовміст матеріалу  $\text{TiO}_2$  за результатами вимірювань маси визначається за формулою:

$$u_i = \frac{m_i - m_{acф}}{m_{acф}}, \quad (\text{Б.43})$$

де  $m_i$  - поточне значення маси зразку вологого флютингу, г;  $m_{асм}$  – маса абсолютно сухого зразку матеріалу діоксиду титану, г.

Значення маси пасти  $TiO_2$  під час сушіння змінювалося, а маса абсолютно сухого матеріалу діоксиду титану для даного зразку є константою. Тоді похибка вимірювання вологовмісту матеріалу  $TiO_2$  становить:

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial m_i} \Delta_{\Sigma m}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_{асф}} \Delta_{\Sigma m}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1,785} \cdot 0,004\right)^2} = 0,00224 \text{ кг/кг}$$

Результат визначення вологовмісту флютингу становить:

$$u = \bar{u} \pm \Delta u = \bar{u} \pm 0,00224 \text{ кг/кг} \quad (\text{Б.44})$$

### **Б.15 Визначення похибок непрямих вимірювань швидкості сушіння пасти діоксиду титану**

Швидкість сушіння пасти діоксиду титану за результатами вимірювань маси та часу визначається за формулою:

$$W_{суш} = \frac{\Delta u}{\Delta \tau} = \frac{\Delta\left(\frac{m_i - m_{асф}}{m_{асф}}\right)}{\Delta \tau} = \frac{\frac{\Delta m_i}{m_{асф}}}{\Delta \tau} = \frac{\Delta m_i}{m_{асф} \cdot \Delta \tau}, \quad (\text{Б.45})$$

де  $\Delta \tau$  – час сушіння, протягом якого осереднюється швидкість, с.

Під час сушіння змінювалися значення маси пасти діоксиду титану та час, а маса абсолютно сухого порошку  $TiO_2$  для даного зразку є константою. Тоді похибка вимірювання швидкості сушіння пасти діоксиду титану становить:

$$W_{суш} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{суш}}{\partial m_i} \Delta_{\Sigma m}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{суш}}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_{асф} \Delta \tau} \Delta_{\Sigma m}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta m_i}{m_{асф} \cdot \Delta \tau^2} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = 2,589 \cdot 10^{-4} \text{ кг/кг} \cdot \text{с.}$$

Результат визначення швидкості сушіння пасти діоксиду титану становить:

$$W_{суш} = \overline{W_{суш}} \pm \Delta W_{суш} = \overline{W_{суш}} \pm 2,589 \cdot 10^{-4} \text{ кг/кг} \cdot \text{с.} \quad (\text{Б.46})$$

**ДОДАТОК В.**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕННІ**  
**КОМПЛЕКСНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

## **В.1 Розрахункові величини при обробці комплексних експериментальних досліджень**

У загальному випадку, номінальний гідравлічний опір шару частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$  у зоні диспергування можна виразити як:

$$\Delta P_{\text{ш}} = H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_{\text{ш}} g \quad (\text{B.1})$$

Маса шару частинок діоксиду титану в зоні диспергування матеріалу визначається:

$$M_{\text{ш}} = \frac{\pi d_{\text{е}}^3}{6} n_{\text{т}} \rho_{\text{ш}} \quad (\text{B.2})$$

де  $n_{\text{т}}$  – кількість твердих частинок.

З іншого боку, якщо загальна поверхня висушування шару частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$   $f_{\text{ш}} = \pi d_{\text{е}}^2 n$  [24], тоді маса шару запишеться як:

$$M_{\text{ш}} = f_{\text{ш}} \frac{d_{\text{е}}}{6} \rho_{\text{ш}} \quad (\text{B.3})$$

Якщо  $f_{\text{ш}}$  необхідна поверхня контакту фаз для ефективного тепломасообміну, то прирівнявши праві частини виразів (B.2) і (B.3) одержимо вираз для визначення висоти псевдозрідженого шару частинок матеріалу, який впливає з необхідних умов проведення тепломасообміну [24, 27]:

$$H_0 = \frac{f_{\text{ш}} \cdot d_{\text{е}}}{6 \cdot F_{\text{а}} \cdot (1 - \varepsilon_0)} \quad (\text{B.4})$$

Еквівалентний діаметр частинок  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі [24]:

$$d_{\text{е}} = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{d_i}} \quad (\text{B.5})$$

де  $X_i$  – масова частка  $i$ -тої фракції;  $d_i$  – середній діаметр  $i$ -тої фракції визначається як середнє геометричне значення еквівалентного розміру частинок матеріалу [24]:

$$d_i = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad (\text{B.6})$$

Розподіл маси частинок  $\text{TiO}_2$  за розміром визначався за результатами мікроскопії отриманого висушеного продукту [37]:

$$g_i = \frac{m_i}{\Delta d_i M_{\text{ш}}} \quad (\text{B.7})$$

де  $m_i$  – маса  $i$ -тої фракції шару, кг;  $\Delta d = (d_2 - d_1)$  – діапазон існування фракції, м.

Число псевдозрідження в сушильному апараті визначається за виразом [41]:

$$K_w = \frac{w_p}{w_{\text{кр}}} \quad (\text{B.8})$$

де  $w_p$  – приведена робоча швидкість в апараті та критична, м/с:

$$w_p = \frac{V}{3600 \cdot F_a} \quad (\text{B.9})$$

$$w_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \nu_r}{d_e} \quad (\text{B.10})$$

де  $\text{Re}_{\text{кр}}$  – критерій Рейнольдса для початку псевдозрідження частинок  $\text{TiO}_2$  з еквівалентним діаметром  $d_e$ :

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (\text{B.11})$$

де  $\varepsilon$  – порозність псевдозрідженого шару;  $Ar$  – критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{g d_e^3 (\rho_r - \rho_g)}{\nu_r^2 \rho_g} \quad (\text{B.12})$$

Кількість випареної води із поверхні частинок у псевдозрідженому шарі  $a_f$ , кг<sub>вол.</sub>/м<sup>2</sup>·год. [27], характеризує інтенсивність тепло- та масообмінних процесів і розраховується за виразом:

$$a_f = \frac{M_b}{f_{\text{ш}}} \quad (\text{B.13})$$

де  $M_b$  – кількість води, яка відводиться із сушильного апарату разом із теплоносієм, кг/год:



$$M_{\text{в}} = \frac{(L_1 - L_2) \rho_{\text{п}} (1 - x_{\text{п}})}{\Delta \tau} \quad (\text{В.14})$$

де  $L_1$  та  $L_2$  – вологовміст теплоносія на вході і виході із сушильної камери, кг/кг.

Загальна поверхня частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$  у псевдозрідженому шарі [34]:

$$f_{\text{ш}} = \frac{6F\Delta P_{\text{ш}}}{d_e \cdot \rho_{\text{т}} g} \quad (\text{В.15})$$

Константа вивантаження, 1/год:

$$K = \frac{G_{\text{вив}}}{M_{\text{ш}}} \quad (\text{В.16})$$

Відповідно, середній час перебування в апараті розраховується за виразом:

$$\tau_{\text{сер}} = \frac{1}{K}. \quad (\text{В.17})$$

## В.2 Опис експериментальної сушильної установки

Сушильна установка призначена для дослідження процесів сушіння та подрібнення тонкодисперсних пастоподібних матеріалів. Конструктивне і технологічне виконання зроблено таким чином, що технологічна схема сушильної установки і конструкція її основних вузлів дозволяє проводити безперервний процес зневоднення пастоподібних матеріалів в широкому діапазоні зміни основних технологічних параметрів [78-79].

Сушильний апарат 4 має конусоподібну камеру, яка має 3 основні технологічні зони: зону подрібнення та висушування поверхневої вологи, зону сепарації та зону досушування [78-79]. Оскільки частинки висушеного матеріалу  $\text{TiO}_2$  на виході із зони досушування мають розміри до 35 мкм, то сушильна камера з'єднана із рукавним фільтром 6 для їх уловлювання та сухого очищення відпрацьованого теплоносія. Вузол 7 для вивантаження

висушеного матеріалу із рукавного фільтру дозволяє вести загальне вивантаження.

У нижній частині сушильної камери встановлено ножовий диспергатор 3, який реалізує безперервне подрібнення висушуваного матеріалу та закручування потоків теплоносія із дифузора, тим самим забезпечуючи створення направлено вихрового руху теплоносія та частинок матеріалу з активним його перемішуванням [78-79].

Нагрів теплоносія, який подається до сушильної камери, проводиться в калорифері 2. Підтримання температури нагрітого теплоносія з точністю  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  здійснюється за вимірами безінерційної хромель-копелевої термопари.

Підтримання заданого значення температури шару в зоні диспергування проводилось за показанням безінерційної хромель-копелевої термопари 33 із точністю  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  шляхом зміни витрат пасти діоксиду титану, яка подається в сушильну камеру за допомогою живильника-дозатора 5 [78-79].

Температура і вологість в робочій зоні ГРП вимірювалися за допомогою датчика-модуля вологості і температури 9 (рисунок 3.8), в якому застосовується мікросхема із інтерфейсом I2C, що забезпечує промислову точність вимірювань, а покази датчика 9 виводилися на монітор комп'ютера 11 [78-79].

Витрати теплоносія вимірювались камерною діафрагмою 12 із точністю  $\pm 0,005 \text{ м}^3/\text{год}$  [78-79].

При роботі установки за допомогою відцентрових вентиляторів 1 та 8 повітря через вимірювальну діафрагму 12 надходить до калорифера 2 [78-79].

Після калорифера теплоносії із заданою температурою через дифузор подається до сушильної камери, де відбувається безпосередній контакт із частинками пасти діоксиду титану. При досягненні температури шару  $95-100^{\circ}\text{C}$  до псевдозрідженого шару подається паста  $\text{TiO}_2$ , яка диспергується ножовим диспергатором 3. При цьому в апараті створюється активний гідродинамічний режим вихрового потоку теплоносія із частинками

матеріалу  $\text{TiO}_2$  із направленою циркуляцією агломератів матеріалу в зогу диспергування [78-79].

Застосування ножового диспергатора обумовлено необхідністю отримати готовий висушений матеріал із дисперсним складом, що відповідає технічним вимогам державних стандартів [78-79].

Відбір проб матеріалу в бюкси із зони диспергування для визначення еквівалентного діаметру частинок проводився через вивантажувальний штуцер у нижній частині сушильної камери.

При проведенні експериментальних досліджень проводилось безперервне вимірювання [78-79]:

- температури теплоносія на вході до апарату  $T_{\text{вх}}$ , °С;
- температури псевдозрідженого шару в зоні диспергування  $T_{\text{ш}}$ , °С;
- температури псевдозрідженого шару в зоні досушування  $T_3$ , °С;
- витрати теплоносія за допомогою камерної діафрагми ( $P_{\text{дз}}$ ), м<sup>3</sup>/год;
- витрати пасти  $\text{TiO}_2$ , яка вводиться у псевдозріджений шар, кг/год. за допомогою електронних ваг, кг;
- перепади тиску на диспергаторі, на зоні тангенційного введення теплоносія, у псевдозрідженому шарі, тиск у апараті – за допомогою дифманометрів 13, 14, 15 з точністю  $\pm 1$  мм.в.ст..

**ДОДАТОК Г.**  
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ СУШИЛЬНОГО АПАРАТУ**

Таблиця Г.1 – Результати експериментальних досліджень перепаду тиску  $\Delta P_{\text{ш}}$  на ножовому диспергаторі при постійній температурі теплоносія  $T_{\text{вх}} = 90^\circ\text{C}$ .

№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_{\text{ш}}$ , Па	№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_{\text{ш}}$ , Па	№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_{\text{ш}}$ , Па
1	0,001534	12,879	38	0,59763	44,972	75	1,214514	112,696
2	0,001754	13,029	39	0,613507	45,225	76	1,24	115,248
3	0,017394	13,627	40	0,629384	46,271	77	1,256129	118,649
4	0,033271	14,029	41	0,645261	47,972	78	1,272257	121,156
5	0,049147	14,582	42	0,661137	48,673	79	1,288386	124,053
6	0,065024	15,058	43	0,677014	50,811	80	1,304514	127,352
7	0,080901	16,573	44	0,692891	51,305	81	1,320643	130,558
8	0,096778	17,719	45	0,708768	52,673	82	1,336771	133,454
9	0,112654	18,466	46	0,724644	53,5	83	1,3529	136,362
10	0,128531	18,911	47	0,740521	54,35	84	1,369028	139,0254
11	0,144408	19,454	48	0,756398	55,949	85	1,385157	142,753
12	0,160285	19,948	49	0,772275	57,5	86	1,401285	145,731
13	0,176161	20,649	50	0,788152	59,248	87	1,417414	148,558
14	0,192038	21,248	51	0,804028	61,649	88	1,433542	151,454
15	0,207915	22,294	52	0,819905	63,248	89	1,449671	154,362
16	0,223792	23,489	53	0,835782	65,753	90	1,4658	157,454
17	0,239669	24,891	54	0,851659	67,603	91	1,481928	160,362
18	0,255545	25,891	55	0,867535	69,35	92	1,498057	163,064
19	0,271422	26,891	56	0,883412	71,856	93	1,514185	166,362
20	0,287299	27,788	57	0,899289	73,512	94	1,530314	169,615
21	0,303176	28,443	58	0,915166	75,109	95	1,546442	172,719
22	0,319052	29,592	59	0,925	77,856	96	1,562571	175,466
23	0,334929	30,489	60	0,935	79,512	97	1,578699	178,466
24	0,350806	31,592	61	0,950877	81,316	98	1,594828	181,466
25	0,366683	32,696	62	0,966754	83,512	99	1,610956	184,316
26	0,38256	33,5	63	0,98263	85,109	100	1,627085	187,42
27	0,398436	34,305	64	0,998507	87,064	101	1,643214	190,569
28	0,414313	35,902	65	1,014384	89,064	102	1,659342	193,018
29	0,43019	36,811	66	1,030261	91,96	103	1,675471	196,271
30	0,446067	37,109	67	1,045901	93,753			
31	0,461943	38,512	68	1,062029	95,35			
32	0,47782	39,615	69	1,11	97,753			
33	0,493697	40,121	70	1,126129	99,995			
34	0,509574	40,926	71	1,15	101,949			
35	0,55	41,867	72	1,166129	103,5			
36	0,565877	42,569	73	1,182257	106,799			
37	0,581754	43,271	74	1,198386	109,547			

Таблиця Г.2 – Результати експериментальних досліджень перепаду тиску  $\Delta P_T$  на тангенційному вході теплоносія в зону досушування при постійній температурі теплоносія  $T_{\text{вх}} = 90^\circ\text{C}$ .

№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_T$ , Па	№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_T$ , Па	№	$w_T$ , м/с	$\Delta P_T$ , Па
1	0,00256	9,569	39	0,441745	41,42	77	0,91336	123,339
2	0,00862	9,764	40	0,453235	43,569	78	0,92485	126,04
3	0,01961	10,511	41	0,464725	44,764	79	0,93634	129,189
4	0,0306	10,961	42	0,476215	45,511	80	0,94783	132,741
5	0,04159	11,281	43	0,487705	47,764	81	0,95932	135,741
6	0,052579	11,604	44	0,499194	48,81	82	0,970809	138,499
7	0,064069	12,103	45	0,510684	50,304	83	0,982299	141,557
8	0,075559	12,902	46	0,522174	52,603	84	0,993789	144,109
9	0,087049	13,35	47	0,533664	54,902	85	1,005279	147,764
10	0,098539	13,742	48	0,545154	56,35	86	1,016769	150,764
11	0,110029	14,338	49	0,556644	58,442	87	1,028259	153,868
12	0,121519	14,787	50	0,568134	60,638	88	1,039749	156,42
13	0,133009	15,536	51	0,579624	62,787	89	1,051239	159,569
14	0,144498	16,086	52	0,591113	64,936	90	1,062728	162,764
15	0,155988	17,431	53	0,602603	66,638	91	1,074218	165,511
16	0,167478	18,178	54	0,614093	68,787	92	1,085708	168,661
17	0,178968	19,028	55	0,625583	70,936	93	1,097198	171,81
18	0,190458	20,178	56	0,637073	73,603	94	1,108688	174,304
19	0,201948	21,729	57	0,658563	75,902	95	1,120178	177,603
20	0,213438	22,132	58	0,675053	77,35	96	1,131668	180,902
21	0,224927	23,327	59	0,686542	79,442	97	1,143157	183,35
22	0,236417	24,028	60	0,698032	81,638	98	1,154647	186,442
23	0,247907	25,235	61	0,709522	83,787	99	1,166137	189,638
24	0,259397	26,281	62	0,731012	85,936	100	1,177627	192,787
25	0,270887	27,787	63	0,742502	88,086	101	1,189117	195,936
26	0,282377	28,189	64	0,753992	90,431	102	1,200607	198,35
27	0,293867	29,086	65	0,765482	92,178			
28	0,305357	30,339	66	0,776972	95,028			
29	0,316846	31,04	67	0,788461	97,178			
30	0,338336	32,189	68	0,799951	99,729			
31	0,349826	33,741	69	0,811441	101,132			
32	0,361316	34,741	70	0,822931	103,327			
33	0,372806	35,499	71	0,834421	105,028			
34	0,384296	36,557	72	0,845911	108,235			
35	0,395786	37,109	73	0,857401	111,281			
36	0,407276	38,764	74	0,87889	114,787			
37	0,418765	39,764	75	0,89038	117,189			
38	0,430255	40,868	76	0,90187	120,086			

**ДОДАТОК Д.**  
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**ПОДРІБНЕННЯ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ НА НОЖОВОМУ**  
**ДИСПЕРГАТОРІ**

Дослідження відбувалися при Об'ємних витратах теплоносія  $V_{(\text{сек})} = 0,042 \text{ м}^3/\text{с}$ , швидкості теплоносія в зоні диспергування  $1,33 \text{ м/с}$ , а вологість подрібнюваного матеріалу становила  $20 \%$ .

Таблиця Д.1 – Результати експериментальних досліджень подрібнення зразків матеріалу діоксиду титану масою  $0,3 \text{ кг}$ ,  $0,6 \text{ кг}$  та  $1 \text{ кг}$ . Об'ємні витрати теплоносія  $V_{(\text{сек})} = 0,042 \text{ м}^3/\text{с}$ , а швидкість теплоносія в зоні диспергування  $1,33 \text{ м/с}$ .

№	Час диспергування, с	Сила струму на приводі диспергатора		
		при $m = 0,3 \text{ кг}$	при $m = 0,6 \text{ кг}$	при $m = 0,6 \text{ кг}$
1	0	0,62	1,18	31,95
2	2	0,62	1,18	32,16
3	4	0,64	1,19	32,99
4	6	0,67	1,19	33,13
5	8	0,69	1,28	35,64
6	10	0,72	1,30	36,15
7	12	0,82	1,39	39,66
8	14	0,82	1,39	39,75
9	16	0,84	1,39	39,91
10	18	0,86	1,39	40,08
11	20	0,87	1,40	40,08
12	22	0,88	1,43	41,03
13	24	0,89	1,43	41,37
14	26	0,90	1,42	41,37
15	28	0,91	1,46	42,22
16	30	0,92	1,46	42,13
17	32	0,93	1,46	42,05
18	34	0,95	1,46	42,13
19	36	0,94	1,43	42,05
20	38	0,94	1,42	41,96
21	40	0,95	1,43	42,05
22	42	0,96	1,43	42,22
23	44	0,99	1,43	42,39
24	46	1,00	1,47	43,43
25	48	1,02	1,46	43,35
26	50	1,04	1,46	43,43
27	52	1,03	1,46	43,35



**ДОДАТОК Е.**  
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КІНЕТИКИ**  
**СУШІННЯ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ В СУШИЛЬНОМУ**  
**АПАРАТІ ВИХРОВОГО ТИПУ**

Таблиця Е.1 – Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння пасти діоксиду титану

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	40	3,41	1,46	0,010	59,9	1	82	2,85	1,06		
1	41	3,40 1	1,45 7			1	83	2,84 3	1,05 4		
1	42	3,39 1	1,45 0			1	84	2,83 2	1,04 6		
1	43	3,37 1	1,43 6			1	85	2,82 1	1,03 8	0,010	65,2
1	44	3,35 8	1,42 6			1	86	2,80 6	1,02 7		
1	45	3,34 5	1,41 7	0,009	61,2	1	87	2,79 7	1,02 1		
1	46	3,33 4	1,40 9			1	88	2,78	1,00 9		
1	47	3,32 8	1,40 5			1	89	2,76 8	1,00 0		
1	48	3,31	1,39 2			1	90	2,75 9	0,99 3	0,009	66,4
1	49	3,29 6	1,38 2			1	91	2,74 5	0,98 3		
1	50	3,28 7	1,37 0	0,009	62	1	92	2,73 4	0,97 5		
1	51	3,27 1	1,36 3			1	93	2,71 9	0,96 5		
1	52	3,25 7	1,35 3			1	94	2,70 4	0,95 4		
1	53	3,24 8	1,34 7			1	95	2,69 3	0,94 6	0,010	66,7

## Продовження таблиці Е.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	124	2,318	0,675			1	166	1,86	0,344		
1	125	2,306	0,666	0,009	69,9	1	167	1,849	0,336		
1	126	2,289	0,654			1	168	1,841	0,330		
1	127	2,28	0,647			1	169	1,835	0,326		
1	128	2,266	0,637			1	170	1,825	0,319	0,006	99,4
1	129	2,254	0,629			1	171	1,822	0,316		
1	130	2,241	0,619	0,009	69,4	1	172	1,813	0,310		
1	131	2,232	0,613			1	173	1,807	0,306		
1	132	2,224	0,607			1	174	1,802	0,302		
1	133	2,209	0,596			1	175	1,792	0,295	0,005	111,2
1	134	2,197	0,587			1	176	1,785	0,290		
1	135	2,178	0,574	0,009	72,4	1	177	1,78	0,286		
1	136	2,167	0,566			1	178	1,771	0,280		
1	137	2,158	0,559			1	179	1,765	0,275		

## Продовження таблиці Е.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	208	1,61 8	0,16 9			1	250	1,48 7	0,07 4	0,002	154, 4
1	209	1,61 3	0,16 5			1	251	1,48 4	0,07 2		
1	210	1,61 3	0,16 5	0,003	153, 3	1	252	1,48 4	0,07 2		
1	211	1,60 7	0,16 1			1	253	1,48 1	0,07 0		
1	212	1,60 6	0,16 0			1	254	1,47 8	0,06 8		
1	213	1,60 5	0,16 0			1	255	1,47 2	0,06 4	0,002	155, 8
1	214	1,59 6	0,15 3			1	256	1,47 3	0,06 4		
1	215	1,59 1	0,15 0	0,003	155, 6	1	257	1,47 1	0,06 3		
1	216	1,59 1	0,15 0			1	258	1,46 8	0,06 1		
1	217	1,58 7	0,14 7			1	259	1,46 3	0,05 7		
1	218	1,58 2	0,14 3			1	260	1,45 9	0,05 4	0,002	160, 2
1	219	1,57 7	0,13 9			1	261	1,46 5	0,05 9		
1	220	1,57 7	0,13 9	0,002	158, 8	1	262	1,46	0,05 5		
1	221	1,57 3	0,13 7			1	263	1,45 4	0,05 1		

## Продовження таблиці Е.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	292	1,41	0,01 9			2	17	3,74 3	1,63 2		
1	293	1,41	0,01 9			2	18	3,72 7	1,62 1		
1	294	1,41	0,01 9			2	19	3,71 3	1,61 1		
1	295	1,41	0,01 9	0,002	160, 9	2	20	3,70 2	1,60 3	0,009	63,4
1	296	1,40 8	0,01 7			2	21	3,68 7	1,59 3		
1	297	1,40 6	0,01 6			2	22	3,67 4	1,58 4		
1	298	1,4	0,01 2			2	23	3,65 7	1,57 2		
1	299	1,4	0,01 2			2	24	3,64 2	1,56 1		
1	300	1,4	0,01 2	0,001	160, 7	2	25	3,63 1	1,55 3	0,010	65,3
1	301	1,4	0,01 2			2	26	3,61 4	1,54 1		
1	302	1,4	0,01 2			2	27	3,60 3	1,53 4		
1	303	1,4	0,01 2			2	28	3,58 5	1,52 1		
1	304	1,39 7	0,00 9			2	29	3,57	1,51 1		
1	305	1,39 9	0,01 1	0,000	157, 9	2	30	3,55 9	1,50 3	0,010	66,7

## Продовження таблиці Е.1

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	59	3,08 3	1,16 8			2	101	2,39	0,68 1		
2	60	3,06 9	1,15 8	0,012	69	2	102	2,37 5	0,67 0		
2	61	3,05 4	1,14 8			2	103	2,35 6	0,65 7		
2	62	3,03 9	1,13 7			2	104	2,34 3	0,64 8		
2	63	3,01 8	1,12 2			2	105	2,32 3	0,63 4	0,012	73,6
2	64	3	1,11 0			2	106	2,30 6	0,62 2		
2	65	2,99 1	1,10 3	0,011	67,8	2	107	2,29 2	0,61 2		
2	66	2,97	1,08 9			2	108	2,27 1	0,59 7		
2	67	2,95 9	1,08 1			2	109	2,26 1	0,59 0		
2	68	2,93 5	1,06 4			2	110	2,24 1	0,57 6	0,012	76,8
2	69	2,91 9	1,05 3			2	111	2,22 3	0,56 3		
2	70	2,90 7	1,04 8	0,011	69,2	2	112	2,21 1	0,55 5		
2	71	2,88 7	1,03 0			2	113	2,19 7	0,54 5		
2	72	2,87 4	1,02 1			2	114	2,18 2	0,53 4		

**ДОДАТОК Є.**  
**РОЗРАХУНОК СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШІННЯ ПАСТИ**  
**ДІОКСИДУ ТИТАНУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИХРОВИХ ПОТОКІВ**  
**ТЕПЛОНОСІЯ**

**Вихідні дані розрахунку:**

Продуктивність сушильного апарату по випареній волозі,  $G_{H_2O} = 500$  кг/год.;

Початкова вологість пасти,  $w_n = 40 \%$ ;

Кінцева залишкова вологість порошку  $TiO_2$ ,  $w_k = 0,3 \%$ ;

Температура теплоносія на вході в апарат,  $t_n = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Температура теплоносія на виході із сушильного апарату,  $t_k = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Початкова температура пасти  $TiO_2$ ,  $t_0 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Початковий еквівалентний діаметр агрегатів пасти, що потрапляють в зону диспергування,  $d_{екв} = 0,003 \text{ м}$ ;

Початкова температура теплоносія до калорифера,  $t'_0 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Відносна вологість повітря на вході в калорифер,  $\varphi_0 = 50\%$ ;

Коефіцієнт теплових втрат,  $\psi = 0,9$ ;

Питома теплоємність діоксиду титану,  $c_{TiO_2} = 760 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$ ;

Питома теплоємність води при  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $c_{H_2O} = 4186 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$ ;

Питома теплота пароутворення,  $r = 2466 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;

Густина сухого порошку  $TiO_2$ ,  $\rho_{TiO_2} = 4230 \frac{\text{кг}\cdot\text{TiO}_2}{\text{м}^3}$ ;

Густина води при  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{H_2O} = 998 \frac{\text{кг}\cdot\text{H}_2\text{O}}{\text{м}^3}$ ;

Густина повітря при середній  $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_n = 0,674 \frac{\text{кг}_n}{\text{м}^3}$ ;

Кінематична в'язкість повітря при середній  $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_0 = 4,06 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;

**Розрахунок:**

1. Визначимо початковий  $U_0$  і кінцевий  $U_{2k}$  вологовмісти продукту  $TiO_2$ :

$$U_0 = \frac{w_n}{100 - w_n} = \frac{40}{100 - 40} = 0,67 \text{ кг}_B/\text{кг}_{\text{а.с.п.}},$$

$$U_{2k} = \frac{w_k}{100 - w_k} = \frac{0,3}{100 - 0,3} = 0,003 \text{ кг}_B/\text{кг}_{\text{а.с.п.}}$$



2. Продуктивність сушильної установки по сухому продукту  $TiO_2$ :

$$G_{TiO_2} = \frac{G_{H_2O}}{U_0} = \frac{500}{0,67} = 750 \frac{кг TiO_2}{год}$$

3. Продуктивність по пасті діоксиду титану:

$$G_n = \frac{G_{H_2O} \cdot 100}{w_n} = \frac{500 \cdot 100}{40} = 1250 \frac{кг_n}{год}$$

4. Початковий і кінцевий вологовмісти теплоносія визначаємо за I-d діаграмою вологого повітря:

$$x_0 = 0,007 \frac{кг_в}{кг_{сухнов}}, x_2 = 0,034 \frac{кг_в}{кг_{сухнов}}$$

5. Питомі витрати теплоносія,  $кг_п/кг_в$ :

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0} = \frac{1}{0,034 - 0,007} = 41,7 \frac{кг_п}{кг_в}$$

6. Визначаємо температуру мокрого термометра за допомогою I-d діаграми вологого повітря при  $t_n = 400^\circ C$ :

$$t_{м.т.} = 57^\circ C$$

7. Тепловий потік на нагрівання пасти діоксиду титану до температури мокрого термометра:

$$Q_{np.} = \frac{G_{TiO_2}}{\psi \cdot 3600} \cdot [(c_{TiO_2} + U_0 \cdot c_{H_2O}) \cdot (t_{м.т.} - t_0) + (U_0 - U_1) \cdot r]$$

$$Q_{np.} = \frac{750}{0,9 \cdot 3600} \cdot [(760 + 0,67 \cdot 4186) \cdot (57 - 17) + (0,67 - U_1) \cdot r]$$

8. Визначаємо кількість води, що відбирається сушильним агентом при сушінні пасти:

$$Q_в = Q_{a.c.m.} \cdot (U_n - U_к) = 4,416 \cdot (1,174 - 0,003) = 5,171 \frac{кг_в}{год}$$

9. Визначаємо масові витрати сушильного агента на сушіння пасти:

$$L_n = l_0 \cdot Q_в = 52,6 \cdot 5,171 = 272 \frac{кг_{сухнов}}{год}$$

10. Визначаємо густину та в'язкість сушильного агента (повітря) при  $t_{c.a.} = 160^\circ C$ :

$$\rho_{c.a.} = 0,815 \frac{кг_{сухнов}}{м^3}$$

$$\vartheta_0 = 3,009 \cdot 10^{-5} \frac{M^2}{c}$$

11. Визначаємо об'ємні витрати сушильного агента на сушіння пасти:

$$V_n = \frac{L_n}{\rho_{c.a.}} = \frac{272}{0,815} = 333,7 \frac{M^3}{200} = 0,093 \frac{M^3}{c}$$

12. Визначаємо густину пасти:

$$\rho_{T_i O_2} = 4230 \frac{K\mathcal{Z}}{M^3},$$

$$\rho_e = 1000 \frac{K\mathcal{Z}}{M^3}$$

$$\rho_{nastu} = \rho_{T_i O_2} \cdot s_n + \rho_e \cdot w_n = 4230 \cdot 0,46 + 1000 \cdot 0,54 = 2486 \frac{K\mathcal{Z}}{M^3}$$

13. Критерій Архімеда в умовах входу (еквівалентний розмір частинок пасти в сушильній камері,  $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ ):

$$Ar = g \cdot d^3 \cdot \frac{\rho_{nastu} - \rho_{c.a.}}{\rho_{c.a.} \cdot \vartheta_0^2} = 9,81 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot \frac{2486 - 0,815}{2,04 \cdot (3,009 \cdot 10^{-5})^2} = 1650$$

14. Розраховуємо критичний критерій Рейнольдса:

Діаметр циліндричної частини сушильної камери  $D_y = 0,31m$

Висота циліндричної частини сушильної камери  $h_y = 0,3m$

$$Re_{kp} = 0,29 \cdot \left(\frac{D_y}{h_y}\right)^{-0,64} \cdot \left(\frac{D_y}{d}\right)^{1,3} \cdot Ar^{0,6} = 0,29 \cdot \left(\frac{0,31}{0,3}\right)^{-0,64} \cdot \left(\frac{0,31}{0,5 \cdot 10^{-3}}\right)^{1,3} \cdot 1650^{0,6} = 103235$$

15. Розраховуємо критичну швидкість сушильного агента:

$$w_{kp} = \frac{Re_{kp} \cdot \vartheta_0}{h_y} = \frac{103235 \cdot 3,009 \cdot 10^{-5}}{0,3} = 10,35 \frac{M}{c}$$

16. Знаходимо робочу швидкість сушильного агента в нижній циліндричній частині при діаметрі 100 мм:

$$r_1 = 0,05m$$

$$w_{p-100} = \frac{V_n}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{0,093}{3,14 \cdot 0,05^2} = 11,85 \frac{M}{c}$$

$$r_2 = 0,155 м$$

$$w_{p-310} = \frac{V_n}{\pi \cdot r_2^2} = \frac{0,093}{3,14 \cdot 0,155^2} = 1,23 \frac{м}{с}$$

$$r_3 = 0,1 м$$

$$w_{p-310} = \frac{V_n}{\pi \cdot r_2^2} = \frac{0,093}{3,14 \cdot 0,1^2} = 2,96 \frac{м}{с}$$

17. Знаходимо поперечний перетин отворів живильника для подачі пасти в камеру сушіння:

приймаємо швидкість руху пасти через отвори живильника

$$w_{жс} = 0,1 \frac{м}{с},$$

тоді загальна площа живого перетину отворів буде:

$$S_{жс} = \frac{Q}{w_{жс} \cdot \rho_{пасти} \cdot 3600} = \frac{9,6}{0,1 \cdot 2486 \cdot 3600} = 10^{-5} м^2$$

знаходимо радіус отворів живильника:

$$r_{жс} = \sqrt{\frac{S_{жс}}{3 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{10^{-5}}{3 \cdot 3,14}} = 0,001 мм$$

**ДОДАТОК Ж.**  
**АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Заступник ректора  
 «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
 Ю.І. Якименко  
 2018 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертації Гробовенка Ярослав Віталійовича  
 «Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану»,  
 що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Цим актом засвідчується, що дисертація асистента кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Гробовенка Ярослава Віталійовича «Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, відповідає напрямку наукових досліджень «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та науковій роботі кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв і безпосередньо пов'язана із науково-ініціативною темою «Процес сушіння дрібнодисперсної пасти діоксиду титану» № 04/15 ІХФ від 20.10.2015 року (Номер державної реєстрації № 0115U005598).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних та практичних занять для напрямку підготовки 133: Галузеве машинобудування для спеціалізації 05050315 — «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання целюлозно-паперового виробництва» із дисципліни «Процеси, апарати і машини галузі» (з кредитних модулів: «Теплові процеси», «Масообмінні процеси»).

Також результати дисертаційної роботи використовуються при дипломному проектуванні, проведенні наукових досліджень та підготовці дисертацій магістрів на кафедрі машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Впровадження результатів дисертації у навчальний процес забезпечується:

**"Затверджую"**

Директор ТОВ "Лакі-Фарма"

Ніколаєв А.В.

04 вересня 2018 р.

**АКТ**

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Гробовенка Я.В.

**"Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану"**

Ми, що підписалися нижче, від ТОВ "Лакі-Фарма" директор Ніколаєв А.В., від КПП ім. Ігоря Сікорського – завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ), д.т.н., проф. Корнієнко Я.М., науковий керівник к.т.н., проф. Марчевський В. М. та аспірант кафедри МАХНВ Гробовенко Я. В. склали цей акт проте, що результати дисертаційної роботи Гробовенка Я. В. будуть впроваджені на виробничих потужностях ТОВ "Лакі-Фарма".

У подальшому результати досліджень будуть використані при розробці промислових сушильних установок для отримання порошків тонкодисперсної пасти діоксиду титану для виробництва наповнювачів для лікарських препаратів.

*Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків***Від ТОВ "Лакі-Фарма"**

Директор



А.В. Ніколаєв

**Від КПП ім. Ігоря Сікорського**

Завідувач кафедри машин та апаратів  
хімічних і нафтопереробних  
виробництв, д.т.н., професор

 Я.М. Корнієнко

Науковий керівник, к.т.н., професор

 В.М. Марчевський

Аспірант

 Я. В. Гробовенко

"Затверджую"

Директор ТОВ "Мілкліенд"

(назва підприємства)

Юркевич Ольга Федорівна



## АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Гробовенка Я.В.  
"Процес сушіння тонкодисперсної пасту діоксиду титану"

Ми, що підписалися нижче, від

(посадові особи від підприємства)

від КПП ім. Ігоря Сікорського – завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ), д.т.н., проф. Корнієнко Я.М., науковий керівник к.т.н., проф. Марчевський В. М. та аспірант кафедри МАХНВ Гробовенко Я. В. склали цей акт проте, що результати дисертаційної роботи Гробовенка Я. В. впроваджені на заводах компанії.

У подальшому результати досліджень будуть використані при розробці промислових сушильних установок для отримання порошків з молочних білкових продуктів (казеїн, сир твердий та сир кисломолочний).

*Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків*

Від Зам. директора по виробництву  
(назва підприємства)

Гайшук В'ячеслав Іванович

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Від КПП ім. Ігоря Сікорського

Завідувач кафедри машин та апаратів  
хімічних і нафтопереробних  
виробництв, д.т.н., професор  
Я.М. Корнієнко

Науковий керівник, к.т.н., професор  
В.М. Марчевський

Аспірант  
Я. В. Гробовенко

